

การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและการประยุกต์  
ใช้งานบนบอร์ด STM32F769I และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ  
REAL TIME DIGITAL AUDIO SIGNAL PROCESSING AND APPLICATIONS ON  
STM32F769I BOARD AND MOBILE APPLICATION



โดย  
นายฐนวกานต์ กายจนสิน  
นางสาวปฎิมากร พวงมณี  
นางสาวพิมพ์ชนก กิจเจริญคำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและการประยุกต์  
ใช้งานบนบอร์ด STM32F769I และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ  
REAL TIME DIGITAL AUDIO SIGNAL PROCESSING AND APPLICATIONS ON  
STM32F769I BOARD AND MOBILE APPLICATION



โดย  
นายรัฐนวกานต์ กาญจนสิน 60010525  
นางสาวปฐิมากร พวงมณี 60010566  
นางสาวพิมพ์ชนก กิจเจริญค้า 60010717

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.อัครพล ตริรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2563 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและการประยุกต์ใช้งานบนบอร์ด

STM32F769I และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ

REAL TIME DIGITAL AUDIO SIGNAL PROCESSING AND APPLICATIONS ON

STM32F769I BOARD AND MOBILE APPLICATION

ผู้จัดทำ

- |                   |             |          |
|-------------------|-------------|----------|
| 1. นายรัฐนวกานต์  | กาญจนสิน    | 60010525 |
| 2. นางสาวปฎิมากร  | พวงมณี      | 60010566 |
| 3. นางสาวพิมพ์ชนก | กิจเจริญค้า | 60010717 |

อศพร อธิวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.อัครพล ตีร์รัตน์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ “การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและการประยุกต์ใช้งานบนบอร์ด STM32F769I และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ” จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ผศ.อัครพล ตริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ศรวรัตน์ ชิวปรีชา ที่ให้คำแนะนำแนะแนวทางการแก้ไขและข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณรุ่นพี่ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทำปริญญานิพนธ์

ขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูงที่คอยช่วยเหลือและให้ความรู้เพิ่มเติมและขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนที่เป็นกำลังใจสำคัญให้แก่ผู้จัดทำให้สามารถทำงานได้ลุล่วงไปด้วยดี

นายฐนวกานต์

นางสาวปฐิมากร

นางสาวพิมพ์ชนก

กาญจนสิน

พวงมณี

กิจเจริญคำ

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและ  
การประยุกต์ใช้งานบนบอร์ด STM32F769I  
และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ  
REAL TIME DIGITAL AUDIO SIGNAL PROCESSING AND  
APPLICATIONS ON STM32F769I  
AND MOBILE APPLICATION

โดย นายณัฐนวกานต์ กาญจนสิน 60010525  
นางสาวปฏิมากร พวงมณี 60010566  
นางสาวพิมพ์ชนก กิจเจริญคำ 60010717

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อัครพล ตริรัตน์

### บทคัดย่อ

เนื่องจากเนื้อหาที่ใช้สำหรับการเรียนการสอนในวิชาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือ Digital Signal Processing มีรายละเอียดที่ซับซ้อน ดังนั้นการนำความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาในรายวิชานี้มาประยุกต์ใช้งานจึงเป็นเรื่องที่สามารถทำได้ยากและไม่ชัดเจน ปริมาณงานที่มอบให้จึงให้ความสนใจกับการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยผู้จัดทำได้นำเอาองค์ความรู้ที่ได้จากการเรียนในรายวิชานี้มาใช้ในการพัฒนาเพื่อให้เห็นภาพของการใช้งานจริงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งในปริมาณงานที่มอบให้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกจะเน้นไปที่เรื่องของ Digital Filter เป็นหลัก โดย Digital Filter จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ในส่วนของ FIR filter และ IIR Filter สำหรับ FIR filter แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของการออกแบบและส่วนของการ Implement โดยการออกแบบสามารถทำได้โดยวิธี Windowing และในส่วนของการ Implement ประกอบด้วย Direct Form และ Linear-Phase Structure โดยในส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบ Graphic Equalizer และสำหรับ IIR Filter แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของการออกแบบและส่วนของการ Implement โดยการออกแบบสามารถทำได้โดยวิธี Pole-zero placement และ Bilinear Transform และในส่วนของการ Implement ประกอบด้วย Direct Form I และ Direct Form II นอกจากนี้ยังมีวิธีเฉพาะคือ Peaking filter ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ Parametric Equalizer และในส่วนของการ Implement ที่กล่าวไปนี้ ผู้จัดทำจะนำไปพัฒนาต่อเป็นการปฏิบัติการทางการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลโดยใช้บอร์ด STM32F769I ในการทำการศึกษาและทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในส่วนที่สองจะเน้นไปที่แอปพลิเคชันสำหรับผู้ที่มีการบกพร่องทางการได้ยิน ซึ่งประกอบด้วย แอปพลิเคชันสำหรับทดสอบการได้ยิน โดยแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินนี้เป็นการทดสอบการได้ยินเบื้องต้นสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ ซึ่งการทดสอบจะเป็นการทดสอบเสียงที่ได้ยินในแต่ละความถี่โดยให้ปรับระดับเสียงต่ำสุดก่อนการทดสอบจากนั้นเริ่มทำการทดสอบ ถ้าไม่ได้ยินเสียงที่ความถี่นั้นๆให้ลองเพิ่มเสียงทีละนิดจนกว่าจะได้ยิน ทำเช่นนี้จัดครบทุกความถี่แล้วจะได้กราฟการทดสอบการได้ยินแล้วสามารถนำค่าที่ได้จากกราฟมาใส่ในแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง และแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง ซึ่งภายในของแอปพลิเคชันนี้จะมีการให้ login และสามารถบันทึกข้อมูลโดยเก็บไว้ใน firebase ได้ โดยในหน้าต่างแอปพลิเคชันจะให้ผู้ใช้ login ใส่ค่าของ Audiogram ลงไปในแต่ละช่องความถี่ ซึ่งค่า Audiogram นี้ถ้าเป็นผู้ป่วยที่วัดค่าจากโรงพยาบาลสามารถนำค่านั้นมาใช้ได้เลย แต่ถ้าไม่มีผลการวัดจากโรงพยาบาลสามารถลองทดสอบได้ในแอปพลิเคชันสำหรับทดสอบการได้ยินได้ โดยผู้จัดทำจะพัฒนาด้วยระบบปฏิบัติการ android

## ABSTRACT

The content of Digital Signal Processing or DSP is complex detail. Therefore, it is too difficult to apply the knowledge that learnt in this subject, so in this thesis will focus on solving this problem. The thesis is divided to two parts. In part one will focus on Digital Filter that divided to FIR filter and IIR Filter. FIR filter divided to two parts, the first one is FIR Filter design and the second is the implement. FIR Filter is designed by using Window Function and in the implement is consist of Direct Form and Linear-Phase Structure. FIR filter will be used in Graphic Equalizer. IIR filter will divide to two parts same as the FIR filter. In the part of design, IIR Filter is designed by using Pole-zero placement and Bilinear Transformation, and in the implement is consist of Direct Form I and Direct Form II. In addition to IIR filter design as mention previously, there is specific method called Peaking Filter that will be used in Parametric Equalizer design. All of knowledge that learnt about Digital Filter will be used to design DSP Laboratory experiment with STM32F769I board. In second part will focus on mobile application for hearing impairment that consists of application for hearing test and hearing-aids application by android operating system. In part of hearing test is the basic of hearing test for the users, it will test the sound that users heard at each frequency by adjusting the sound level to the lowest before the test starts. If user couldn't hear the sound at that frequency, the system will adjust the sound level higher until the user hear it.

Do this again in all frequency and then the users will get a hearing test curve. The users will use the value from this curve to set hearing-aid application. In the part of

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

hearing-aid application, the users have to login to save the data as a firebase. The data is Audiogram values in each frequency channel. If users are patient who measured the audiogram at the hospital, they can apply the value of this audiogram in this application. If there is not hospital measurement result, the users can be tested in a hearing test application.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	V
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XVIII
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	2
2.2 ระบบเวลาจริง	2
2.3 การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อก	3
2.4 ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด	5
2.5 ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบไม่จำกัด	6
2.6 เครื่องปรับสัญญาณเสียง	9
2.7 บอร์ด STM32F769I	10
2.8 การสูญเสียการได้ยิน	19
2.9 วิธีการทดสอบการได้ยิน	20
2.10 มาตรฐาน ISO: 8253-1	22
2.11 ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	24
2.12 โปรแกรม Android Studio	26
2.13 ภาษาจาวา	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
<b>บทที่ 3</b>	<b>ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด</b>	<b>33</b>
	3.1 การออกแบบ	33
	3.2 โครงสร้าง	51
	3.3 โปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	53
	3.4 การจัดเก็บผลการทดลอง	53
	3.5 ผลการทดสอบข้อจำกัดการรองรับค่า filter length ที่บอร์ด STM32F769I สามารถรองรับได้	54
	3.6 ผลการทดสอบการสร้าง FIR filter ด้วยวิธี Window Method โดยใช้ Kaiser window function	55
	3.7 ผลการทดสอบการสร้าง Graphic Equalizer	78
<b>บทที่ 4</b>	<b>ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบไม่จำกัด</b>	<b>81</b>
	4.1 การออกแบบ	81
	4.2 โครงสร้าง	105
	4.3 โปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	108
	4.4 การจัดเก็บผลการทดลอง	109
	4.5 ผลการทดสอบการสร้าง IIR Filter ด้วยวิธี Pole Zero Placement	110
	4.6 ผลการทดสอบการสร้าง IIR Filter ด้วยวิธี Butterworth	125
<b>บทที่ 5</b>	<b>แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ</b>	<b>131</b>
	5.1 การออกแบบ	131
	5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	152
	5.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	152
	5.4 ผลการทดลอง	153
<b>บทที่ 6</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	
	6.1 สรุปผล	156
	6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	157

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ภาคผนวก ก	คำสั่งโปรแกรม Android Studio ของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน	162
ภาคผนวก ข	คำสั่งโปรแกรม Android Studio ของแอปพลิเคชันช่วยฟัง	184
ภาคผนวก ค	Experimental Hand Book of Digital Signal Processing System Using STM32F769I	208



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	3
2.2	4
2.3	10
2.4	11
2.5	13
2.6	14
2.7	14
2.8	15
2.9	17
2.10	17
2.11	18
2.12	18
2.13	27
2.14	27
2.15	28
2.16	29
2.17	29
2.18	30
2.19	30
3.1	35
3.2	36
3.3	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hamming window function ในหน่วย dB	37
3.5 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hamming window function	37
3.6 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hamming window function	38
3.7 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Blackman window function ในหน่วย dB	38
3.8 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Blackman window function	39
3.9 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Blackman window function	39
3.10 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB	42
3.11 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	43
3.12 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	43
3.13 Amplitude response ของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB	44
3.14 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	44
3.15 Phase response ของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	45
3.16 Amplitude response ของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB	45
3.17 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 Phase response ของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	47
3.19 Amplitude response ของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB	47
3.20 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	48
3.21 Phase response ของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function	48
3.22 Amplitude response ของฟิลเตอร์แต่ละแบนด์ใน 3-band Graphic Equalizer ในหน่วย dB	50
3.23 Amplitude response รวมของ 3-band Graphic Equalizer ที่ค่าเกนของทุกแบนด์มีค่าเป็น 0 dB	51
3.24 โครงสร้าง Direct Form ของ 7-tap FIR filter	52
3.25 โครงสร้าง linear-phase structure ของ 7-TAP FIR filter	52
3.26 โครงสร้าง Simulink block ที่ใช้ในการสร้าง FIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I	54
3.27 โครงสร้าง MATLAB M-File Function block ที่ใช้ในการสร้าง FIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I	55
3.28 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Lowpass filter ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	56
3.29 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Highpass filter ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	57
3.30 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandpass filter ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	58
3.31 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandstop filter ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	59
3.32 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Lowpass filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Highpass filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	61
3.34 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandpass filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	62
3.35 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandstop filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	63
3.36 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Lowpass filter	64
3.37 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 3 kHz ของ FIR Lowpass filter	64
3.38 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Highpass filter	65
3.39 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Highpass filter	66
3.40 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandpass filter	66
3.41 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 4 kHz ของ FIR Bandpass filter	67
3.42 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandpass filter	67
3.43 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Bandstop filter	68
3.44 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandstop filter	69
3.45 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandstop filter	69
3.46 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 500 Hz ของ FIR Lowpass filter	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.47	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Lowpass filter	71
3.48	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 3 kHz ของ FIR Lowpass filter	71
3.49	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Highpass filter	72
3.50	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 5.5 kHz ของ FIR Highpass filter	73
3.51	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Highpass filter	73
3.52	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 7 kHz ของ FIR Highpass filter	74
3.53	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandpass filter	75
3.54	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 4 kHz ของ FIR Bandpass filter	75
3.55	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandpass filter	76
3.56	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Bandstop filter	77
3.57	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandstop filter	77
3.58	วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณซายน์ที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandstop filter	78
3.59	โครงสร้าง Simulink block ที่ใช้ในการสร้าง 3-band Graphic Equalizer เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I แล้วทำการปรับค่าแบบ Real Time	79
3.60	ผลการวัด total amplitude response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยให้ค่าเกณฑ์ทุกแบนด์เท่ากับ 0 dB	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยให้ค่าเกณฑ์ทุกแบนด์เท่ากับ 0 dB อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.61 ผลการวัด total amplitude response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยให้ค่าเกณฑ์ของ Lowpass filter -15 dB, ค่าเกณฑ์ของ Bandpass filter 12 dB และค่าเกณฑ์ของ Highpass filter 0 dB	80
4.1 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Lowpass filter	83
4.2 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter	84
4.3 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Lowpass Filter	84
4.4 กราฟ Z-PLANE ของ 2ND IIR Highpass filter	85
4.5 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter	85
4.6 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Highpass Filter	86
4.7 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Bandpass filter	87
4.8 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter	87
4.9 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Bandpass Filter	88
4.10 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Bandstop filter	88
4.11 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Bandstop Filter	89
4.12 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Bandstop Filter	89
4.13 กราฟ Amplitude response ของ 6th order IIR Lowpass filter	93
4.14 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเกณฑ์	99
4.15 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า G	99
4.16 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า B	101
4.17 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า G	101
4.18 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า	102
4.19 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเกณฑ์	103
4.20 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า	104
4.21 กราฟ AMPLITUDE RESPONSE ของ PARAMETRIC EQUALIZER	104
4.22 โครงสร้าง IIR FILTER แบบ DIRECT FORM I	105
4.23 โครงสร้าง IIR FILTER แบบ DIRECT FORM II	106
4.24 ออกแบบ IIR FILTER แบบ CASCADE	106
4.25 ออกแบบ IIR FILTER แบบ PARALLEL	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 วงจร Parametric Equalizer	107
4.27 ส่วน low boost/cut shelving filter 1 band ของ Parametric EQ	107
4.28 ส่วน peaking filter (EQ band) 3 band ของ Parametric EQ	108
4.29 ส่วน high boost/cut shelving filter 1 band ของ Parametric EQ	108
4.30 โครงสร้าง Simulink block ที่ใช้ในการสร้าง IIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I	110
4.31 โครงสร้าง MATLAB Function block ที่ใช้ในการสร้าง IIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I	110
4.32 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	111
4.33 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	112
4.34 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	113
4.35 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandstop Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer	114
4.36 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	115
4.37 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter ที่สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	116
4.38 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	117
4.39 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR bandstop Filter สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer	118
4.40 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1kHz ของ 2nd IIR Lowpass Filter	119
4.41 วัดสัญญาณใน TIME DOMAIN ด้วยการป้อนสัญญาณ SINE ที่ความถี่ 7 KHZ ของ 2ND IIR LOWPASS FILTER	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ 2nd IIR Highpass Filter	120
4.43 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Highpass Filter	121
4.44 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter	122
4.45 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 3.25kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter	122
4.46 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter	123
4.47 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter	124
4.48 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 3.25kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter	124
4.49 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter	125
4.50 ผลจากการวัด Amplitude Response ของ IIR Lowpass Filter แบบ Cascade จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer	126
4.51 ผลจากการวัด Amplitude Response ของ IIR Lowpass Filter แบบ Parallel จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer	127
4.52 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Cascade	128
4.53 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 5 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Cascade	128
4.54 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Parallel	129
4.55 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 5 KHZ ของ IIR Lowpass Filter แบบ Parallel	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับรับเสียงเข้าแล้วส่งเสียงออกในระบบเวลาจริง	131
5.2 คำสั่งเลือกรูปแบบสัญญาณที่ถูกสร้างให้เป็นสัญญาณไซน์	133
5.3 คำสั่งสร้างเสียงสัญญาณไซน์ทั้ง 7 ความถี่	134
5.4 ผังงาน flowchart แสดงการทำงานโดยรวมของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน	135
5.5 หน้าต่างการทำงานแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน	137
5.6 ตัวอย่างการทำงานเบื้องต้นของหน้าต่างแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ ระดับเสียง 10 เดซิเบล	138
5.7 โครงสร้างของ nonuniform FIR Digital Filter Bank	139
5.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของส่วนประกอบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง nonuniform filter bank ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่าน	140
5.9 คูของ complementary filter ที่ใช้ unit delay ร่วมกัน	141
5.10 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ $H(z)$ และ $H_c(z)$	142
5.11 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ $F_m(z)$ และ $F_{mc}(z)$	142
5.12 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ $H(z)$ , $H(z^2)$ , $H(z^4)$ และ $H(z^8)$	143
5.13 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ $F_m(z)$ , $F_m(z^2)$ และ $F_m(z^4)$	143
5.14 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ nonuniform filter bank ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่าน	144
5.15 audiogram จำลอง	145
5.16 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากการกลับ audiogram จากรูปที่ 5.15 (Ideal filter) กับ matching filter	146
5.17 ผังงาน flowchart แสดงการทำงานโดยรวมของแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง	147
5.18 หน้าต่างการทำงานแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง	147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.19	คำสั่งที่ใช้ในการคำนวณค่า interpolated gain จากค่าระดับเสียง สัญญาณที่กรอกไว้ในหน้าต่างแอปพลิเคชันหลังจากที่กดปุ่ม START	148
5.20	คำสั่งในการสร้างบัพเฟอร์ที่ใช้ทั้งหมดในการสร้างวงจรกรองความถี่	149
5.21	คำสั่งประสิทธิภาพทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองความถี่	150
5.22	คำสั่งที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองความถี่ทั้งหมด	151
5.23	คำสั่งสำหรับนำวงจรกรองความถี่ทั้งหมดมา interpolation กัน	151
5.24	หน้าต่างแอปพลิเคชันเมื่อทำการทดสอบการได้ยินทุกค่าความถี่แล้ว	154
5.25	แสดงหน้าต่างแอปพลิเคชันเมื่อกรอกค่าต่างๆเรียบร้อยแล้วและขณะแอป พลิเคชันกำลังทำงาน	155



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงข้อมูลโดยสรุปของระดับความดันสูงสุดของ permissible ambient sound ( $L_{\max}$ ) แบบเต็ม octave สำหรับ Air-conduction audiometry	22
2.2	แสดงค่าลดทอนความดัน Permissible ambient noise	23
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Ideal Impulse Response กับชนิดของฟิลเตอร์	33
3.2	window function ที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป	34
3.3	ค่า Transition Width ของแต่ละ Window Function	35
5.1	แสดงค่า correction values ที่คำนวณได้จากความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ [58] ผลลัพธ์จากสมการที่ 5.2	136



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากเนื้อหาที่ใช้สำหรับการเรียนการสอนในวิชาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหรือ Digital Signal Processing มีรายละเอียดที่มากและมีความซับซ้อน ทำให้ออกเหนือจากการสอบวัดผลแล้ว การนำความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาวิชานี้ไปประยุกต์ใช้งานจึงเป็นเรื่องที่ยากและไม่ชัดเจน ปริมาณงานนี้จึงให้ความสนใจกับการแก้ไขปัญหาดังกล่าว สามารถช่วยให้เห็นภาพการใช้งานจริงได้ชัดเจนยิ่งขึ้นและนำไปพัฒนาต่อเป็นแอปพลิเคชันที่สามารถใช้ได้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งปริมาณงานนี้จะมุ่งเน้นไปที่เรื่องของ Digital Filter เป็นหลัก โดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการใช้งานฮาร์ดแวร์เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด STM32F769I เพื่อจัดทำเป็นรูปเล่มแลปเพื่อการศึกษาและส่วนของแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android ในส่วนนี้จะถูกนำไปต่อยอดเพื่อการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับผู้ที่บกพร่องด้านการได้ยินและแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการสร้าง Digital Filter สำหรับการประมวลผลสัญญาณในระบบเวลาจริง
- 2) เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิชาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับแอปพลิเคชันที่เลือกใช้
  - 2.1) ศึกษาวิธีการสร้าง real time Graphic Equalizer บนบอร์ด STM32F769I
  - 2.2) ศึกษาวิธีการสร้าง real time Parametric Equalizer บนบอร์ด STM32F769I
- 3) เพื่อศึกษาและพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับผู้ที่บกพร่องทางการได้ยิน

### 1.3 ขอบเขตของปริมาณงาน

- 1) ศึกษาเรื่องการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- 2) ศึกษาการใช้งานบอร์ด STM32F769I ร่วมกับโปรแกรม Simulink
- 3) ศึกษาการใช้งานเครื่อง Dynamic Signal Analyzer สำหรับวัดผลตอบสนองเชิงความถี่
- 4) ศึกษาวิธีการออกแบบและสร้าง Digital Filter
- 5) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสูญเสียการได้ยิน (hearing loss) และ audiogram
- 6) ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Android Studio ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน
- 7) ศึกษาวิธีการออกแบบและสร้างแอปพลิเคชันเพื่อใช้สำหรับทดสอบการได้ยิน
- 8) ศึกษาการออกแบบและสร้างแอปพลิเคชันช่วยฟัง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริญาพนธ์เรื่อง “การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและแอปพลิเคชันบนบอร์ด STM32F769I และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ” ได้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบวงจรกรองความถี่แล้วนำวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบนั้นไปพัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ด้านระบบเสียง โดยใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อออกแบบวงจรกรองความถี่ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งมีทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 2.1 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกกันว่า DSP ย่อมาจาก “Digital Signal Processing” คือ กระบวนการวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนสัญญาณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการใช้อัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์และการคำนวณต่างๆกับสัญญาณอะนาล็อกและสัญญาณดิจิทัลเพื่อสร้างสัญญาณที่มีคุณภาพสูงกว่าสัญญาณเดิม

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลใช้ตรวจจับข้อผิดพลาด เพื่อกรองและบีบอัดสัญญาณอะนาล็อกในระหว่างการส่ง เป็นการประมวลผลสัญญาณประเภทหนึ่งที่ทำเนิการผ่านตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหรืออุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันซึ่งสามารถเรียกใช้อัลกอริทึมตัวประมวลผลเฉพาะทางของ DSP [1] โดยทั่วไปการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital) ก่อน ซึ่งสัญญาณดิจิทัลที่ประมวลผลนั้นจะผ่านการสุ่มตัวอย่าง (Signal Sampling) จะได้ผลลัพธ์เป็นลำดับของตัวเลขที่แสดงตัวอย่างของตัวแปรต่อเนื่องในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่

#### 2.2 ระบบเวลาจริง

ดร.ธนารัช ธีระมันคง (2549 : 15-16) ได้กล่าวถึงการประมวลผลแบบเรียลไทม์ไว้ว่า ระบบเรียลไทม์เป็นระบบที่มีการประมวลผลเสร็จสิ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยตอบสนองอะไรบางอย่าง เช่น การแสดงผลบนหน้าจอตามคำสั่งของผู้ควบคุมเครื่องมือ [2] หรือถ้าระบบนั้นมีการประมวลผลไม่เสร็จภายในเวลาที่กำหนดจะต้องมี Buffer คอยช่วย

ระบบเรียลไทม์ คือ ระบบที่เมื่อใส่อินพุตเข้าไปแล้วตอบสนองทันที ในทางอุดมคติระบบเรียลไทม์จะไม่มีการสูญเสียเวลาที่ใช้ในการประมวลผล แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถสร้างระบบเรียลไทม์ในอุดมคติได้ ซึ่งจะทำให้เพียงลดเวลาการประมวลผลให้น้อยที่สุดจนไม่เห็นความแตกต่างของช่วงเวลาที่ป้อนอินพุตเข้าไปและได้รับเอาต์พุตออกมา เวลาของความแตกต่างนี้เรียกว่า “เวลาตอบสนอง” (Response Time) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาใดเห็น ใบใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

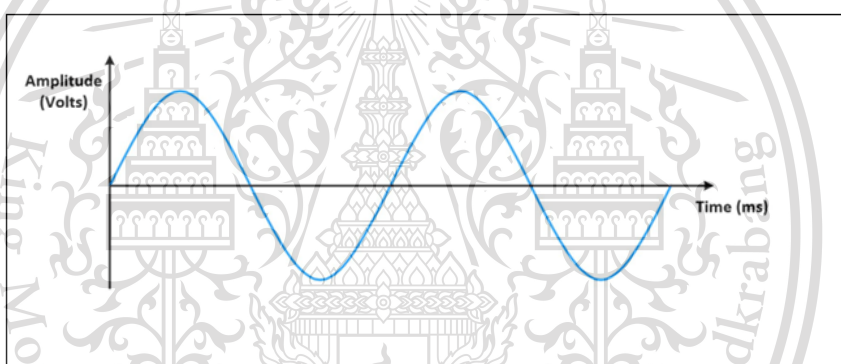
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.3 การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital) และการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อก (Digital to Analog)

สัญญาณ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลจากระบบหนึ่งหรือเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง สัญญาณเป็นฟังก์ชันที่บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารทางโทรคมนาคม หมายถึง แรงดันไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีข้อมูลซึ่งแปรผันตามเวลา [4]

สัญญาณอะนาล็อก (Analog Signal) หมายถึง สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไป มีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกันไป ดังรูปที่ 2.1 [5] โดยการส่งสัญญาณแบบอะนาล็อกจะถูกรบกวนให้มีความผิดพลาดได้ง่าย เช่น สัญญาณเสียงในสายโทรศัพท์ เป็นต้น



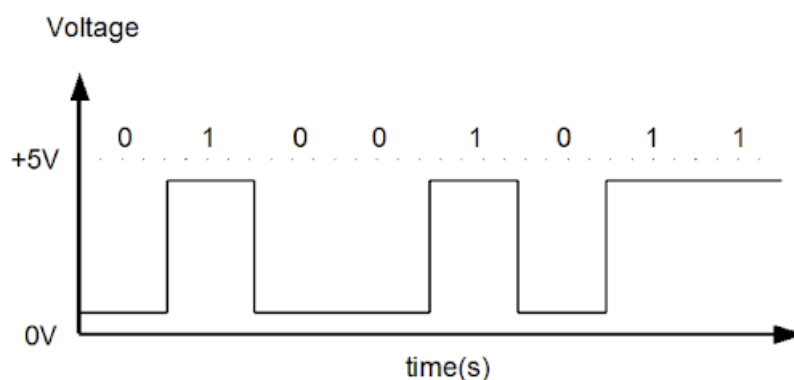
รูปที่ 2.1 สัญญาณอะนาล็อก

สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) หมายถึง สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา มีขนาดแน่นอน คือ สัญญาณระดับสูงสุดและสัญญาณระดับต่ำสุด ซึ่งสัญญาณดิจิทัลนี้เป็นค่าของเลขลงตัว โดยปกติมักแทนด้วยระดับแรงดันที่แสดงสถานะเป็น “0” และ “1” หรืออาจจะมีหลายสถานะ ซึ่งจะกล่าวถึงในเรื่องระบบสื่อสารดิจิทัลมีค่าที่ตั้งไว้ (Threshold) เป็นค่าบอกสถานะ ถ้าสูงเกินค่าที่ตั้งไว้สถานะเป็น “1” ถ้าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้สถานะเป็น “0” ดังรูปที่ 2.2 [6] ซึ่งมีข้อดีในการทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยลง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 สัญญาณดิจิทัล

### 2.3.1 การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้น จะแปลงสัญญาณอะนาล็อกที่มีความต่อเนื่องทางเวลาและแอมพลิจูดต่อเนื่องให้เป็นสัญญาณดิจิทัลแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาและแอมพลิจูดไม่ต่อเนื่อง การแปลงสัญญาณนั้นเกี่ยวข้องกับการหาปริมาณทางอินพุต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีข้อผิดพลาดหรือสัญญาณรบกวนเล็กน้อย นอกจากนี้การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะทำการแปลงเป็นระยะๆด้วยวิธีการสุ่ม (Sampling) อินพุต โดยจำกัดแบนด์วิธของสัญญาณอินพุต

ประสิทธิภาพของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้น หลักๆ คือ แบนด์วิธและอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ration: SNR) แบนด์วิธของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นมีลักษณะเฉพาะตามอัตราการสุ่มตัวอย่าง อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีผลกระทบต่อหลายปัจจัย รวมถึงความละเอียด ความเป็นเชิงเส้นและความแม่นยำ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอยู่ในเทอมของจำนวนบิตที่ใช้งานจริง (Effective Number Of Bits : ENOS) เป็นการวัดช่วงไดนามิกของตัวแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อก [8] จำนวนบิตของแต่ละการวัดจะส่งกลับมาโดยไม่มีสัญญาณรบกวน การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในอุดมคติจะมี ENOS เท่ากับความละเอียด การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นถูกเลือกให้เข้ากับแบนด์วิธและ SNR ที่ต้องการเพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ถ้าการทำงานของ การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่อัตราการสุ่มมากกว่าสองเท่าของแบนด์วิธของสัญญาณจะเป็นไปตามทฤษฎีการสุ่ม Nyquist-Shannon [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.2 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อก

การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกเป็นระบบที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกโดยดำเนินการย้อนกลับกับการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกจะแปลงตัวเลขที่มีความแม่นยำเป็นปริมาณทางกายภาพ เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือความดัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกมักใช้เพื่อแปลงข้อมูลตามลำดับเวลาที่มีความแม่นยำเป็นสัญญาณทางกายภาพที่แปรผันอย่างต่อเนื่อง

การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกในอุดมคตินั้นจะแปลงตัวเลขให้เป็นลำดับของแรงกระตุ้นที่ประมวลผลโดยตัวกรองความถี่ใช้ในการแก้ไขบางรูปแบบเพื่อสร้างข้อมูลใหม่ระหว่างแรงกระตุ้น ในทางปฏิบัติการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกจะแปลงตัวเลขที่ละเอียดให้เป็นฟังก์ชันคงที่ซึ่งหาได้จากลำดับของฟังก์ชันสี่เหลี่ยมที่เป็นแบบจำลอง Zero-Order hold การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกด้วยวิธีอื่นๆ สร้างการมอดูเลตความหนาแน่นพัลส์ของเอาต์พุตที่สามารถกรองสัญญาณที่แตกต่างกันได้

ตามทฤษฎีการสุ่ม Nyquist-Shannon การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อกสามารถสร้างสัญญาณเดิมขึ้นมาใหม่จากการสุ่มข้อมูลโดยที่แบนด์วิธต้องตรงตามข้อกำหนด เช่น สัญญาณ baseband ที่แบนด์วิธน้อยกว่าความถี่ Nyquist การสุ่มแบบดิจิทัลทำให้เกิดความผิดพลาดเชิงปริมาณที่ปรากฏเป็นสัญญาณรบกวนระดับต่ำในสัญญาณที่สร้างขึ้นใหม่ [10]

## 2.4 ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด

FIR ย่อมาจาก Finite Impulse Response คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด (การตอบสนองต่ออินพุตที่มีความยาวจำกัด) มีระยะเวลาจำกัด เนื่องจากจะรวมกันเป็นศูนย์ในเวลาที่ยาวจำกัด

FIR filter อาจเป็นเวลาไม่ต่อเนื่องหรือเวลาต่อเนื่องและดิจิทัลหรืออะนาล็อก

สำหรับ FIR filter แบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา อันดับ  $N$  แต่ละค่าของลำดับเอาต์พุต คือ ผลรวมถ่วงน้ำหนักของค่าอินพุตล่าสุด ดังสมการที่ 2.1

$$z \quad y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots + b_Nx[n-N] \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อ  $x[n]$  คือ สัญญาณอินพุต

$y[n]$  คือ สัญญาณเอาต์พุต

$N$  คือ อันดับ filter,  $N^{\text{th}}$  order filter จะมีเทอม  $N+1$  อยู่ทางขวามือ

และ  $b_i$  คือ ค่าของผลตอบสนองอิมพัลส์ลำดับที่  $i$  สำหรับ  $0 \leq i \leq N$  ของ  $N^{\text{th}}$  order filter ถ้าตัวกรองเป็น FIR filter แบบ direct form  $b_i$  คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง

การคำนวณนี้เรียกอีกอย่างว่า convolution แบบไม่ต่อเนื่อง

$x[n-i]$  ในคำเหล่านี้มักเรียกกันว่า taps ตามโครงสร้างของเส้นห่วงเวลาโดยการนำไปใช้งานหรือบล็อกไดอะแกรมจำนวนมากให้อินพุตล่าช้าในการดำเนินการคูณ อาจพูดถึงลำดับที่ 5 ตัวกรอง 6-tap เป็นต้น

การตอบสนองต่อแรงกระตุ้นของตัวกรองจะไม่เป็นศูนย์ในช่วงเวลาที่จำกัด รวมถึงศูนย์ การตอบสนองของแรงกระตุ้นคือลำดับที่ไม่มีที่สิ้นสุด ดังสมการที่ 2.2

$$h[n] = \sum_{i=0}^N b_i \cdot \delta[n-i] = \begin{cases} b_n & 0 \leq n \leq N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

ถ้า FIR filter เป็นแบบ non-causal ค่าในช่วงที่ไม่เป็นศูนย์ในผลตอบสนองอิมพัลส์สามารถเริ่มต้นก่อน  $n=0$  [11]

ข้อดีของ FIR filter

- 1) มีความเสถียร (stable)
- 2) สามารถออกแบบให้ผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear phase) ได้ง่าย

[12]

## 2.5 ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบไม่จำกัด

IIR ย่อมาจาก Infinite impulse response เป็นคุณสมบัติที่ใช้กับระบบที่ไม่แปรผันตามเวลาที่มีความโดดเด่นด้วยการตอบสนองอิมพัลส์  $h(t)$  ซึ่งไม่กลายเป็นศูนย์เมื่อผ่านจุดหนึ่งไป แต่ดำเนินต่อไปเรื่อยๆ สิ่งนี้ตรงกันข้ามกับระบบการตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด (FIR) ซึ่งการตอบสนองของอิมพัลส์จะกลายเป็นศูนย์ในบางครั้ง  $t > T$  สำหรับ  $T$  จำกัด ดังนั้นจึงมีระยะเวลาจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นว่าเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตัวอย่างของระบบไม่แปรผันตามเวลาเชิงเส้น ส่วนมากคืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และตัวกรองดิจิทัล ระบบที่มีคุณสมบัตินี้เรียกว่าระบบ IIR หรือ IIR filter

ในทางปฏิบัติการตอบสนองของอิมพัลส์ แม็ของระบบ IIR มักจะเข้าใกล้ศูนย์และสามารถผ่านจุดหนึ่งไปได้ อย่างไรก็ตาม ระบบทางกายภาพที่ก่อให้เกิดการตอบสนอง IIR หรือ FIR ที่แตกต่างกันนั้นก็ยังมีความสำคัญของความแตกต่าง ตัวอย่างเช่น ตัวกรองอิเล็กทรอนิกส์แบบอะนาล็อกที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (อาจเป็นแอมพลิฟายเออร์เชิงเส้น) โดยทั่วไปจะเป็นตัวกรอง IIR ในทางกลับกันตัวกรองไม่ต่อเนื่องทางเวลา (โดยปกติจะเป็นตัวกรองดิจิทัล) ขึ้นอยู่กับเส้นหน่วยเวลา ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ ในตัวกรองอะนาล็อกมี “หน่วยความจำ” และสถานะภายในของมันแรงกระตุ้น (สมมติว่าเป็นตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบคลาสสิกที่ไม่สนใจผลกระทบทางควอนตัม) แต่ในกรณีหลัง หลังจากที่อิมพัลส์มาถึงจุดสิ้นสุดของเส้นหน่วยเวลา ระบบจะไม่มีหน่วยความจำของแรงกระตุ้นนั้นและกลับสู่สถานะเริ่มต้น การตอบสนองของอิมพัลส์นอกเหนือจากจุดนั้นเท่ากับศูนย์

ตัวกรองดิจิทัลมักจะอธิบายและนำไปใช้ในรูปของสมการความแตกต่าง (differential equation) ที่กำหนดว่าสัญญาณเอาต์พุตเกี่ยวข้องกับสัญญาณอินพุตอย่างไร ดังสมการที่ 2.3

$$y[n] = \frac{1}{a_0} (b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_p x[n-P] - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2] - \dots - a_Q y[n-Q]) \quad (2.3)$$

เมื่อ P คือ ลำดับของตัวกรอง feedforward

$b_i$  คือ สัมประสิทธิ์ตัวกรอง feedforward

Q คือ ลำดับของตัวกรอง feedback

$a_i$  คือ สัมประสิทธิ์ตัวกรอง feedback

$x[n]$  คือ สัญญาณอินพุต

$y[n]$  คือ สัญญาณเอาต์พุต

สามารถย่อสมการได้ ดังสมการที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$y[n] = \frac{1}{a_0} \left( \sum_{i=0}^P b_i x[n-i] - \sum_{j=1}^Q a_j y[n-j] \right) \quad (2.4)$$

เมื่อจัดเรียงใหม่จะกลายเป็น สมการที่ 2.5

$$\sum_{j=1}^Q a_j y[n-j] = \sum_{i=0}^P b_i x[n-i] \quad (2.5)$$

ในการหา Transfer Function ของตัวกรองอันดับแรกเราจะทำการแปลง  $z$  ของแต่ละด้านของสมการข้างต้นโดยที่เราใช้คุณสมบัติการเลื่อนเวลา ดังสมการที่ 2.6

$$\sum_{j=1}^Q a_j z^{-j} Y(z) = \sum_{i=0}^P b_i z^{-i} X(z) \quad (2.6)$$

เรากำหนด Transfer Function ให้เป็นสมการที่ 2.7

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{\sum_{j=0}^Q a_j z^{-j}} \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาว่าในตัวกรอง IIR ส่วนใหญ่ออกแบบโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์  $a_0$  คือ 1 Transfer Function ของตัวกรอง IIR จะอยู่ในรูปแบบดั้งเดิม ดังสมการที่ 2.8 [13]

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^P b_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^Q a_j z^{-j}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.6 เครื่องปรับสัญญาณเสียง

EQ หรือ Equalizer เป็นเครื่องมือที่ใช้เพิ่มหรือลดระดับเสียง ทุ่ม กลาง แแหลม ตามย่านความถี่ (Frequency) ในแต่ละช่วงตามต้องการเพื่อชดเชยความถี่เสียงขาดหายไปหรือลดความถี่เสียงที่ดังเกินไปเพื่อให้เกิดความสมดุลของเสียง ปรับแต่งเสียงให้เสียงมีความสมจริงและให้เข้ากับสภาพห้อง จัดการโทนเสียงให้มีให้มีความไพเราะตามอรรถรสของผู้ฟัง EQ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้ดังนี้

### 2.6.1 Graphic Equalizer

EQ ประเภทนี้ออกแบบมาให้เพิ่มหรือลดย่านความถี่เฉพาะตามที่คุณออกแบบกำหนดมาจากโรงงาน โดยจะระบุตัวเลขในแต่ละความถี่ไว้ที่ตัวปรับความถี่แต่ละตัว หากต้องการที่จะปรับแต่งเสียง สามารถเลือกปรับเสียงได้เฉพาะความถี่นั้นๆ โดยปกติแล้ว EQ ชนิดนี้มักจะเชื่อมต่อเข้ากับ Mixer Output เพื่อปรับซาวด์โดยรวม แต่ก็ยังมีแบบ Software ในคอมพิวเตอร์เช่นกัน โดย Graphic EQ นั้นแต่ละย่านความถี่นั้นจะถูกแยกอย่างละเอียด EQ แบบนี้พบได้ตั้งแต่ในโปรแกรมฟังเพลงทั่วไป ไปจนถึงตามเอฟเฟ็คก์ดีตาร์ สตูดิโอห้องอัด และงานคอนเสิร์ตต่างๆ

### 2.6.2 Parametric Equalizer

Parametric Equalizer จะเป็นแบบที่ละเอียดที่สุดและค่อนข้างซับซ้อนต่อการใช้งาน EQ ประเภทนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถเลื่อนหาย่านความถี่ได้อย่างอิสระ ผู้ใช้งานสามารถกำหนดย่านความถี่ด้วยตัวเอง โดยการปรับความถี่ดังกล่าวจะทำให้ย่านความถี่ใกล้เคียงได้รับผลไปด้วย ใน Parametric Equalizer หนึ่งตัวอาจปรับค่าความถี่พร้อมๆกันได้หลายความถี่ ซึ่ง EQ ประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการมิกซ์เสียงเพลงเนื่องจากความละเอียดในการปรับนั้น มักพบได้ในโปรแกรมทำเพลงต่างๆ [14] นอกจากนี้เรายังมักจะพบอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ใน Parametric Equalizer

- 1) Band (Bandwidth) ช่วงความถี่ของคลื่น ใน EQ หนึ่งชุดสามารถมีได้หลาย Band
- 2) Frequency ตำแหน่งความถี่ที่ต้องการปรับแต่ง มีหน่วยเป็น Hz
- 3) Q ค่ากำหนดความกว้างของช่วงความถี่เสียง
- 4) Gain ค่าความดังของความถี่นั้นๆ สามารถเพิ่ม (Boost) หรือลด (Cut) ตามความ

เหมาะสม

ความแตกต่างของ EQ ทั้งสองแบบต่างกันว่า Graphic Equalizer ถูกกำหนดย่านความถี่ตายตัวมาจากโรงงาน ผู้ใช้งานมีหน้าที่เพิ่มหรือลด Gain ของย่านความถี่นั้นๆตามความเหมาะสม แต่ Parametric Equalizer เป็น EQ ที่สามารถเลื่อนหาย่านความถี่ได้อย่างอิสระ สามารถกำหนดย่านความถี่ด้วยตัวเอง และสามารถทำได้ละเอียดกว่า หลักการใช้งาน EQ ควรทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การลดดีกว่าการเพิ่ม เช่น เมื่อต้องการเสียงแหลม ให้เราลดเบสแทนการบูสเสียงแหลม เพื่อลดปัญหาการเพิ่มพลังงานให้กับระบบ [15]

## 2.7 บอร์ด STM32F769I

32F769IDISCOVERY Discovery kit เป็นแพลตฟอร์มสาธิตและพัฒนาจนสมบูรณ์แบบสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F769NIH6 ที่ใช้คอร์ STMicroelectronics Arm®Cortex®-M7 ประกอบด้วย I2C สี่ตัว, SPI หกตัวพร้อมด้วยมัลติเพล็กซ์ I2S แบบมัลติเพล็กซ์สามตัว 2xSDMMC, USART สี่ตัว, UART สี่ตัว, บัส CAN สามตัว, ADC 12 บิตสามตัว, DAC 12 บิต สองตัว, SAI สองตัว, อินเทอร์เฟซโมดูลกล้องดิจิทัล 8 ถึง 14 บิต SRAM ภายใน 512 + 4-Kbyte และหน่วยความจำแฟลช 2 Mbyte, USB HS OTG และ USB FS OTG, Ethernet MAC, อินเทอร์เฟซ FMC, อินเทอร์เฟซ Quad-SPI และการสนับสนุนการดีบั๊ก SWD

ชุด Discovery เสนอสิ่งที่จำเป็นเพื่อเริ่มต้นใช้งานอย่างรวดเร็วและพัฒนาแอปพลิเคชันได้ง่าย คุณลักษณะฮาร์ดแวร์เต็มรูปแบบที่มีอยู่ในชุด 32F769IDISCOVERY Discovery สำหรับรุ่น STM32F769I-DISC1 ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ช่วยให้ผู้ใช้สามารถประเมินอุปกรณ์ต่อพ่วง คือ USB OTG HS, อีเธอร์เน็ต 10/100-Mbit, microSD™, USART, SAI Audio DAC สเตอริโอพร้อมแจ็คเสียงสองช่องสำหรับอินพุตและเอาต์พุตไมโครโฟนดิจิทัล ST MEMS, SDRAM, หน่วยความจำแฟลช Quad-SPI, อินพุต เอาต์พุต SPDIF และ หน้าจอ LCD ของ DSI พร้อมแผงมัลติทัช



รูปที่ 2.3 STM32F769I – DISC1 (top view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 STM32F769I – DISC1 (bottom view)

### 2.7.1 คุณสมบัติ

- 1) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ STM32F769NIH6 Arm® (a) ซึ่งมีหน่วยความจำแฟลช 2 เมกะไบต์และ RAM 512 + 16 + 4 Kbytes ในแพ็คเกจ BGA216
- 2) บนบอร์ด ST-LINK / V2-1 รองรับการตั้งค่า USB ซ้ำ
- 3) ฟังก์ชัน USB ST-LINK : พอร์ต COM เสมือนที่เก็บข้อมูลขนาดใหญ่พอร์ตดีบั๊ก
- 4) อุปกรณ์เสริมสำหรับการแสดงผล : DSI LCD อะแดปเตอร์ HDMI และอะแดปเตอร์ DSI
- 5) ตัวแปลงสัญญาณเสียง SAI
- 6) แจ็คเสียงสองสาย แจ็คสายหนึ่งสำหรับอินพุตและอีกหนึ่งสำหรับเอาต์พุต
- 7) เอาต์พุตลำโพงสเตอริโอ
- 8) ไมโครโฟน ST-MEMS สี่ตัวบนอินพุต DFSDM
- 9) อินพุตและเอาต์พุต SPDIF RCA สองตัว
- 10) ปุ่มกดสองปุ่ม (ผู้ใช้และรีเซ็ต)
- 11) หน่วยความจำแฟลช 512-Mbit Quad-SPI Flash
- 12) SDRAM 128-Mbit
- 13) ขั้วต่อสำหรับการ์ด microSD™

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์หรือจัดทำฟังก์ชันใหม่ (Daughterboard) [16] Ext-EEP

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 15) USB OTG HS พร้อมขั้วต่อ micro-AB
- 16) ขั้วต่ออีเทอร์เน็ตที่สอดคล้องกับ IEEE-802.3-2002
- 17) ตัวเลือกแหล่งจ่ายไฟห้าตัว
  - ST LINK/V2-1
  - ขั้วต่อ USB HS
  - 5 V จาก RJ45 (Power Over Ethernet)
  - 5 V จาก Arduino <sup>TM</sup>หรือขั้วต่อภายนอก
  - USB charger
- 18) Power Over Ethernet ตามมาตรฐาน IEEE 802.3af (Powered Device, 48 V ถึง 5 V, 3 W)
- 19) เอาต์พุตแหล่งจ่ายไฟสำหรับการใช้งานภายนอก 3.3 V หรือ 5 V
- 20) ขั้วต่อ Arduino <sup>TM</sup> Uno V3
- 21) ซอฟต์แวร์ฟรีที่ครอบคลุมรวมถึงความหลากหลายของตัวอย่างซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแพ็คเกจ STM32Cube
- 22) รองรับโดยสภาพแวดล้อมการพัฒนาแบบบูรณาการที่มีให้เลือกมากมาย

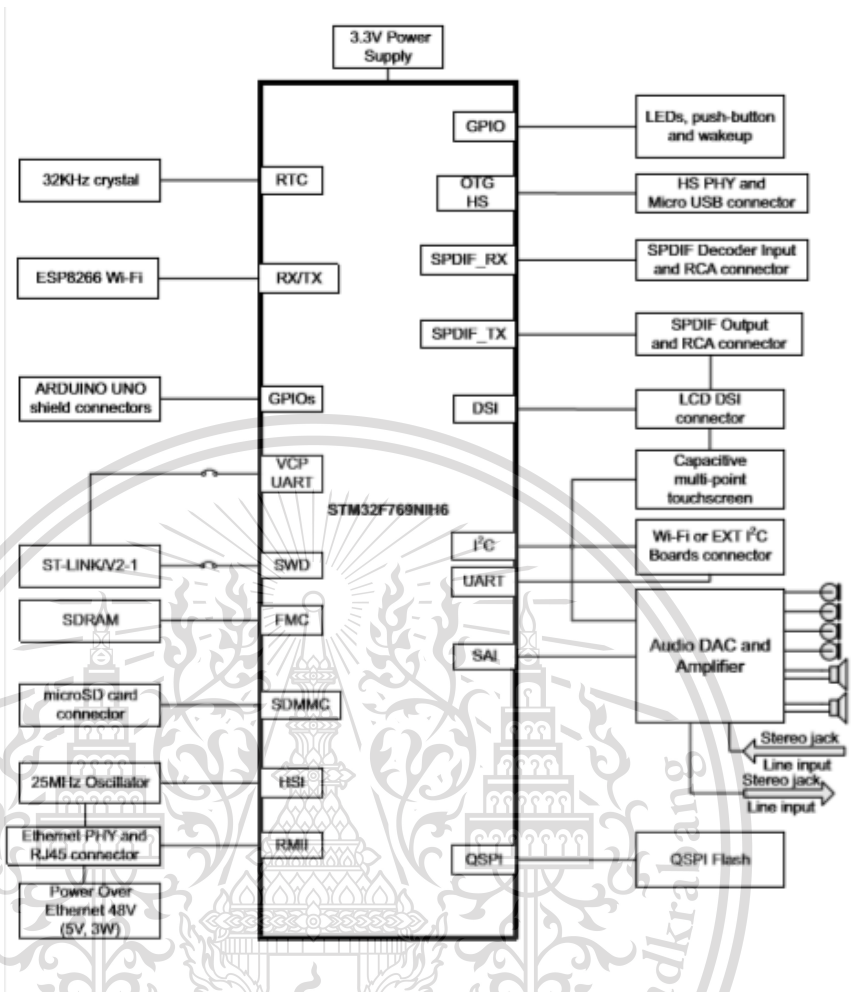
## 2.7.2 เค้าโครงฮาร์ดแวร์และการกำหนดค่า

บอร์ด STM32F769 DISCOVERY Discovery ได้รับการออกแบบโดยใช้ STM32F769NIH6 แผนภาพบล็อกฮาร์ดแวร์ ดังรูปที่ 2.5 แสดงการเชื่อมต่อระหว่าง STM32F769NIH6 และอุปกรณ์ต่อพ่วง (SDRAM, หน่วยความจำแฟลช Quad-SPI, ขั้วต่อ LCD DSI, ขั้วต่อ USB OTG, USART, อีเทอร์เน็ต, เสียง, SPDIF RCA ใน, SPDIF RCA out, microSD <sup>TM</sup> การ์ด Arduino <sup>TM</sup> Uno shields และ ST-LINK ในตัว) ดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ช่วยผู้ใช้ในการค้นหาคุณสมบัติเหล่านี้บนบอร์ด Discovery ขนาดเชิงกลของบอร์ด Discovery แสดงไว้ในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

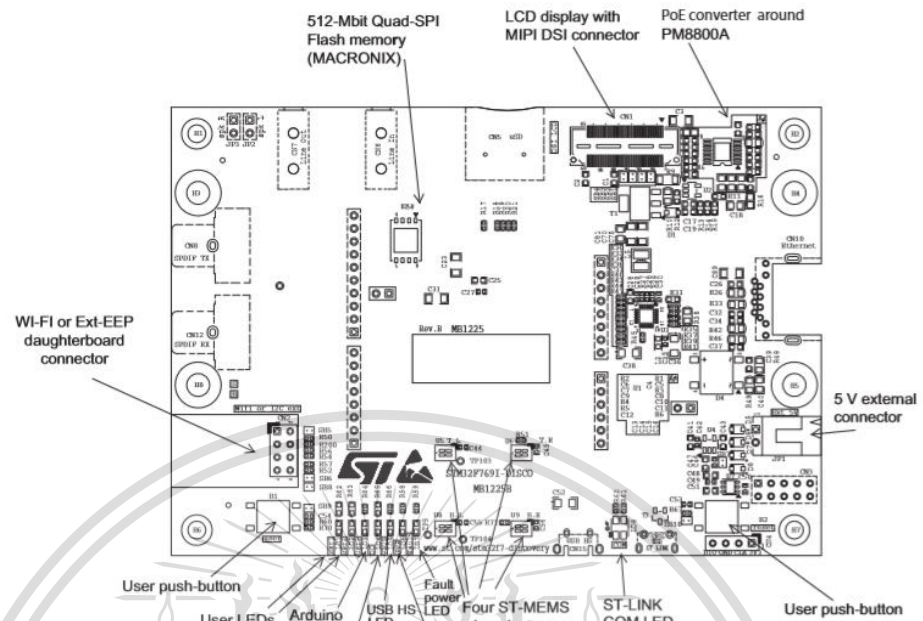


รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกฮาร์ดแวร์

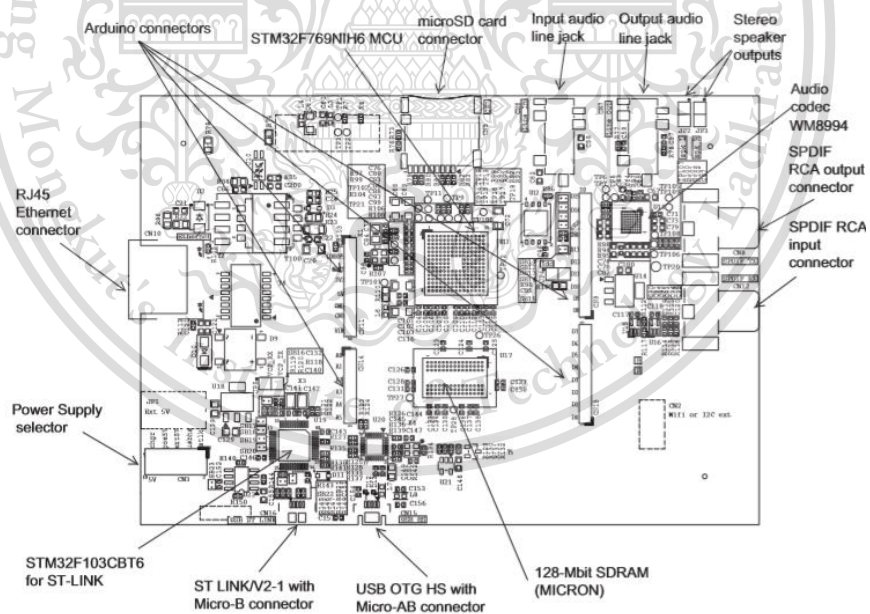
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 32F769IDISCOVERY top layout

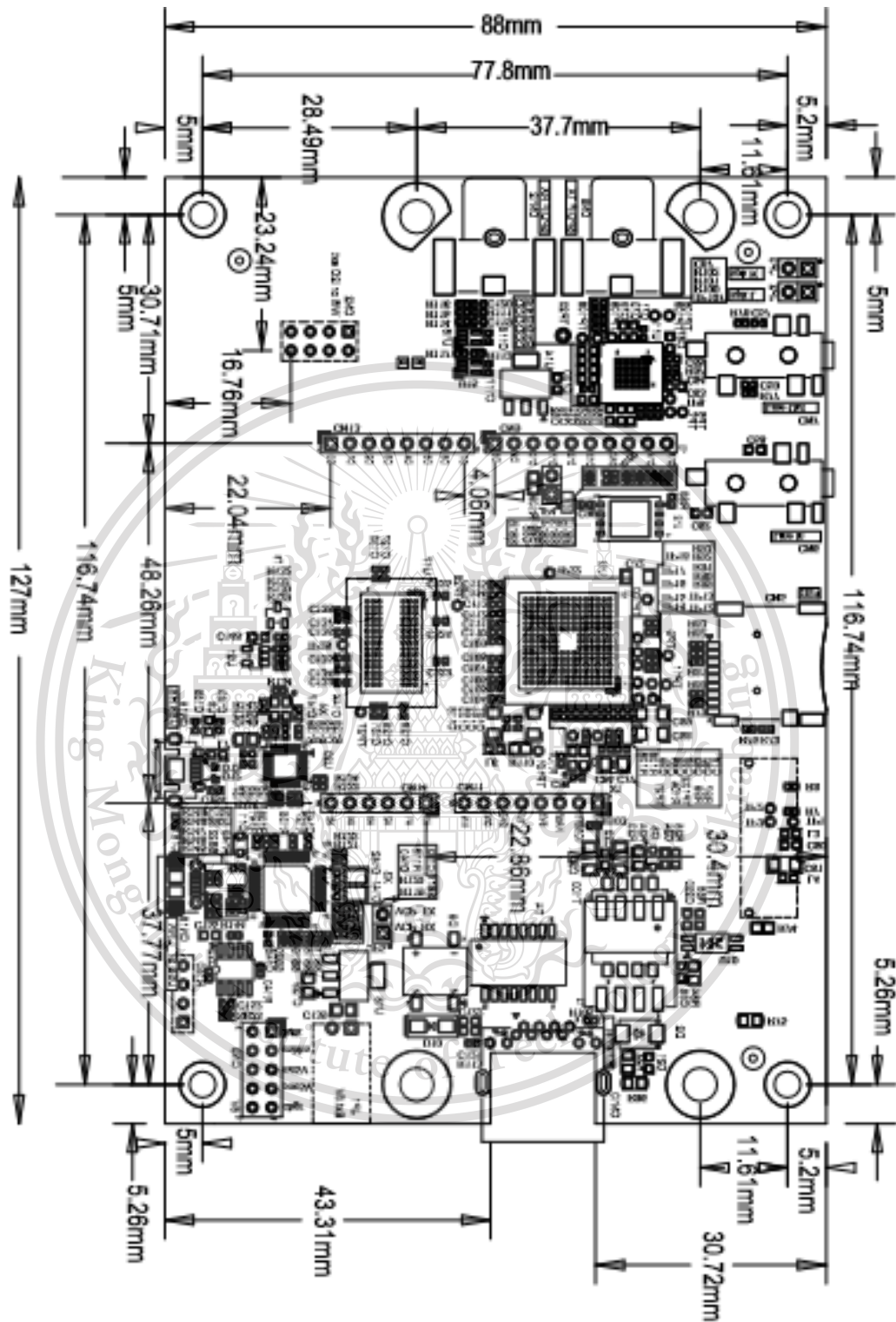


รูปที่ 2.7 32F769IDISCOVERY bottom layout

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.8 32F769IDISCOVERY เซิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.7.3 ST-LINK/ V2-1 ในตัว

เครื่องมือการเขียนโปรแกรมและการดีบั๊ก ST-LINK/ V2-1 ถูกรวมเข้ากับบอร์ด 32F769IDISCOVERY Discovery เมื่อเทียบกับ ST-LINK/ V2 การเปลี่ยนแปลงอยู่ที่คุณสมบัติใหม่ ที่รองรับบน ST-LINK/ V2-1 ได้แก่

- 1) การแจงนับซอฟต์แวร์ USB ใหม่
- 2) อินเทอร์เฟซพอร์ต COM เสมือนบน USB
- 3) อินเทอร์เฟซที่เก็บข้อมูลขนาดใหญ่บน USB
- 4) จัดการพลังงาน USB สำหรับพลังงานมากกว่า 100mA บน USB คุณสมบัติเหล่านี้ ไม่มีแล้วได้รับการสนับสนุนบน ST-LINK/ V2-1
- 5) อินเทอร์เฟซ SWIM
- 6) แรงดันไฟฟ้าของแอปพลิเคชันต่ำกว่า 3 V สำหรับข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติ การดีบั๊กและการเขียนโปรแกรมที่พบบ่อยสำหรับทั้งเวอร์ชัน V2 และ V2-1 โปรดดูที่ ST-LINK/ V2 in- วงจรดีบั๊กเกอร์ โปรแกรมเมอร์สำหรับคู่มือผู้ใช้ STM8 และ STM32 (UM1075)

#### 2.7.3.1 Driver

ST-LINK/ V2-1 ต้องใช้ไดรเวอร์ USB เฉพาะซึ่งสำหรับ Windows® XP 7 และ 8 มีให้ที่เว็บไซต์ [www.st.com](http://www.st.com) ในกรณีที่บอร์ด 32F769IDISCOVERY Discovery เชื่อมต่อกับพีซีก่อนที่จะติดตั้งไดรเวอร์อินเทอร์เฟซ 32F769IDISCOVERY บางส่วนอาจถูกประกาศว่า “ไม่รู้จัก” ในตัวจัดการอุปกรณ์พีซี ในกรณีนี้ผู้ใช้ต้องติดตั้งไฟล์ไดรเวอร์และอัปเดตไดรเวอร์ของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อจากตัวจัดการอุปกรณ์

หมายเหตุ ควรใช้แอนเดิล “USB Composite Device” เพื่อการกู้คืนทั้งหมด

#### 2.7.3.2 การอัปเดตเฟิร์มแวร์ ST-LINK/ V2-1

ST-LINK / V2-1 ฝั่งกลไกการอัปเดตเฟิร์มแวร์สำหรับการอัปเดตในแหล่งกำเนิดผ่านพอร์ต USB เนื่องจากเฟิร์มแวร์อาจมีการพัฒนาในช่วงอายุการใช้งานของ ST-LINK / V2-1 ขอแนะนำให้เข้าไปที่เว็บไซต์ [www.st.com](http://www.st.com) ก่อนเริ่ม ใช้บอร์ด 32F769IDISCOVERY Discovery และเป็นระยะเพื่ออัปเดตเฟิร์มแวร์เวอร์ชันล่าสุด [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

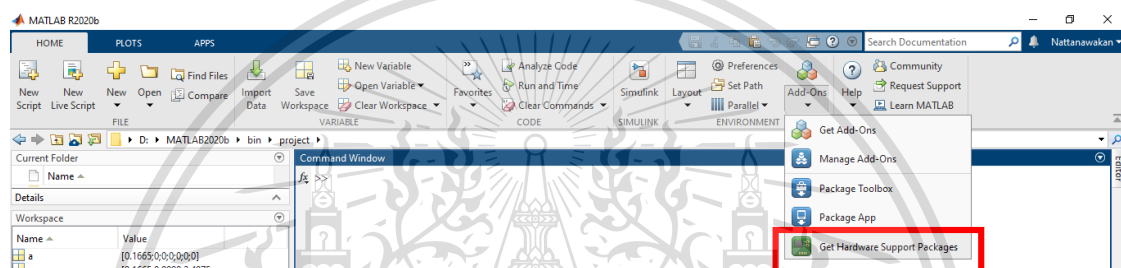
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.7.4 การติดตั้ง support package ในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ทำงานร่วมกับบอร์ด STM32F769I

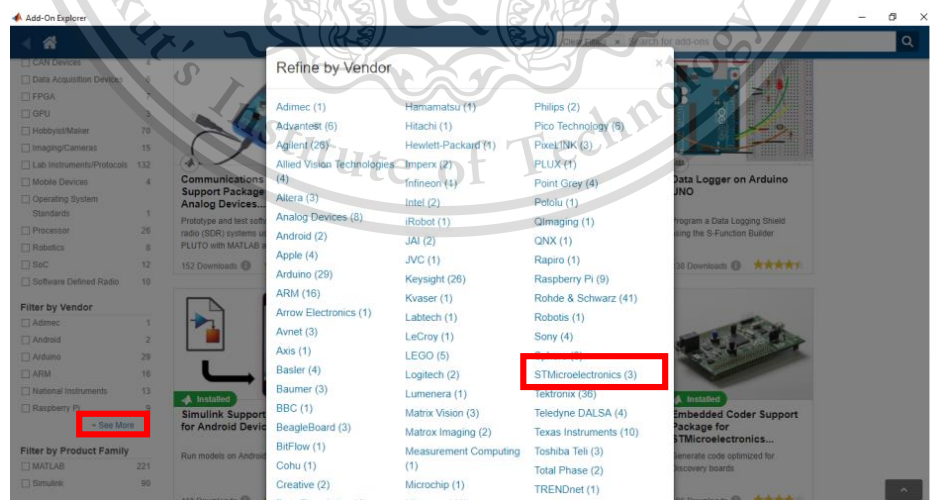
ทำการติดตั้งเพื่อให้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB สามารถ build วงจรต่างๆ ลงในบอร์ด STM32F769I ได้ โดย MATLAB ต้องเป็นเวอร์ชัน R2018a ขึ้นไป และต้องใช้สาย micro USB data cable ร่วมด้วย ขั้นตอนการติดตั้งมีดังนี้

1) เลือก Add-Ons บน Menu tab ไปที่ Get Hardware Support Packages แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งเมนู Get Hardware Support Packages

2) เข้าไปที่ See More ในส่วน Filter by Vendor (แถบด้านซ้าย) แล้วเลือก STMicroelectronics ตามกรอบสีแดงในรูปที่ 2.10



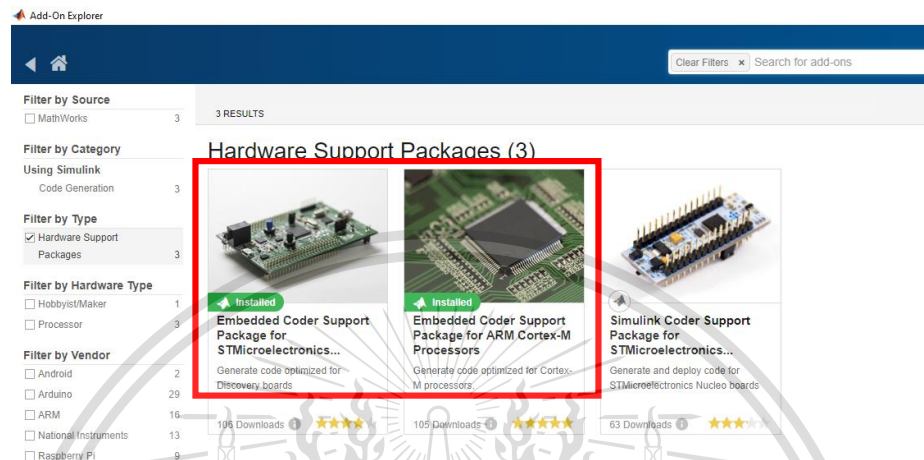
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.10 ตำแหน่งเมนู STMicroelectronics

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

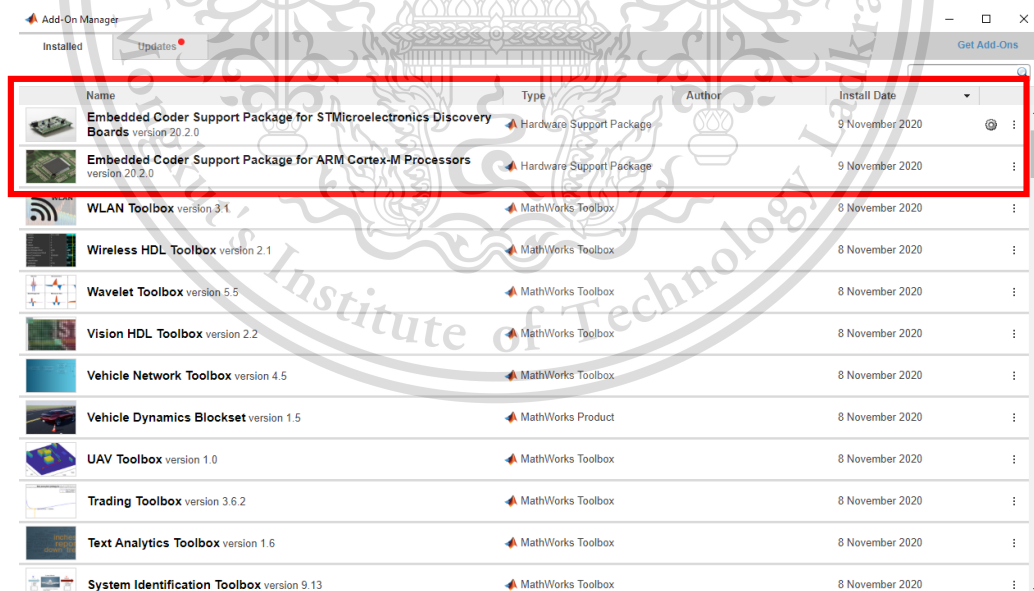
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) ทำการติดตั้ง Hardware Support Packages 2 ตัว คือ “Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics Discovery Boards” และ “Embedded Coder Support Package for ARM Cortex-M Processors” แสดงในกรอบสีแดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Hardware Support Packages ที่ต้องการติดตั้ง

4) เมื่อทำการติดตั้งสำเร็จหน้าต่าง Add-Ons Manager จะแสดงเครื่องมือที่เคยติดตั้งสำเร็จทั้งหมด ซึ่งจะปรากฏ Hardware Support Packages ที่ทำการติดตั้งล่าสุดดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 Add-Ons Manager ที่ปรากฏ Hardware Support Packages ที่ทำการติดตั้งล่าสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.8 การสูญเสียการได้ยิน

การสูญเสียการได้ยิน (hearing loss) คือการที่หูข้างเดียวหรือทั้งสองข้างได้ยินเสียงลดลงหรือไม่ได้ยินเสียงใดๆ เลย โดยระดับของการได้ยินนั้นมีตั้งแต่หูตึงเพียงเล็กน้อยไปจนถึงหูหนวกซึ่งหมายความว่าเสียงที่จะได้ยินต้องดังกว่า 90 เดซิเบลขึ้นไป

สาเหตุที่ทำให้คนเราสูญเสียความสามารถในการได้ยินมีมากมาย เช่น อายุ กรรมพันธุ์ การได้รับบาดเจ็บ อยู่กับเสียงดังเป็นเวลานาน และโรคร้ายต่างๆ แต่สาเหตุที่พบบ่อยที่สุดคือประสาทหูเสื่อมจากอายุที่เพิ่มขึ้น เราจึงมักพบภาวะนี้ในผู้ที่มีอายุตั้งแต่ 50 ปีขึ้นไป และพบมากถึง 2 ใน 3 ในผู้ใหญ่ที่มีอายุมากกว่า 70 ปี

การสูญเสียการได้ยินนั้นนอกจากจะส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงกับการดำรงชีวิตแล้ว [18] อาจก่อให้เกิดอุปสรรคในการสื่อความหมาย เป็นปัญหาในการดำรงชีวิตประจำวันและคุณภาพชีวิตลดลงในผู้ใหญ่ หรือทำให้พัฒนาการทางภาษาและการพูดผิดปกติในเด็ก รวมถึงอาจเกิดจากสาเหตุที่เป็นภาวะเรื้อรังและเป็นอันตราย ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการวินิจฉัยหาสาเหตุและให้การดูแลรักษา ฟันฟูสร้างเสริมสมรรถภาพทางการได้ยินและการพูดให้แก่ผู้ป่วยโดยแพทย์เฉพาะทาง นอกจากนี้ควรทราบแนวทางการซักประวัติ ตรวจร่างกาย ซ้อมบ่งชี้ในการส่งตรวจพิเศษ และสาเหตุที่พบบ่อย เพื่อการวินิจฉัยและรักษาเบื้องต้นหรือพิจารณาส่งต่อผู้ป่วยไปยังแพทย์เฉพาะทางได้อย่างเหมาะสม

### ประเภทของการสูญเสียการได้ยิน

1) การนำเสียงบกพร่อง (Conductive hearing loss: CHL) เกิดจากความผิดปกติที่หูชั้นนอก (external auditory canal) เยื่อแก้วหู (tympanic membrane) และหูชั้นกลาง (middle ear) ทำให้มีความผิดปกติของการส่งผ่านคลื่นเสียงไปสู่หูชั้นใน

2) ประสาทรับฟังเสียงบกพร่อง (Sensorineural hearing loss: SNHL) เกิดจากความผิดปกติในหูชั้นใน (cochlea) ตรงส่วนของเซลล์ประสาทรับเสียงที่พบบ่อย คือ outer hair cell หรือความผิดปกติที่ประสาทรับฟังเสียง (acoustic nerve)

3) การรับฟังเสียงบกพร่องแบบผสม (mixed hearing loss) เกิดจากความผิดปกติในระบบการนำเสียงร่วมกับประสาทรับฟังเสียงบกพร่อง พบในโรคที่มีความผิดปกติที่หูชั้นกลางและหูชั้นในร่วมกัน

4) ความบกพร่องที่สมองส่วนกลาง (Central hearing loss) เกิดจากความผิดปกติของสมองส่วนที่ทำหน้าที่แปลความหมายของเสียง ทำให้ผู้ป่วยได้ยินเสียงแต่ไม่สามารถแปลความหมายของสัญญาณนั้นได้

5) การรับฟังเสียงบกพร่องจากสภาวะทางจิตใจ (Functional hearing loss) เป็นภาวะที่มีปัญหาการได้ยินเนื่องจากความผิดปกติทางจิตใจ ไม่ได้เกิดจากความผิดปกติของระบบการได้ยิน [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.9 วิธีการทดสอบการได้ยิน

มีวิธีการทดสอบการได้ยินนั้นทำได้หลายวิธีแต่ในปริญญานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการทดสอบแบบ Pure-tone air conduction คือการตรวจวัดการได้ยินโดยการนำเสียงผ่านอากาศ

การตรวจการได้ยินด้วยเสียงแบบ Pure-tone หรือการตรวจการได้ยินแบบ Pure-tone เป็นการทดสอบการได้ยิน หลักที่ใช้ในการระบุระดับเกณฑ์การได้ยินของแต่ละบุคคลทำให้สามารถกำหนดระดับ, ประเภทและรูปแบบของการสูญเสียการได้ยิน และเป็นพื้นฐานสำหรับการตรวจวัดเสียงแบบ Pure-tone เป็นการวัดเชิงพฤติกรรมของเกณฑ์การได้ยินเนื่องจากอาศัยการตอบสนองของผู้ป่วยต่อสิ่งเร้าด้วย Pure-tone ดังนั้นการตรวจวัดเสียงด้วย Pure-tone จึงใช้กับผู้ใหญ่และเด็กที่มีอายุมากพอกับขั้นตอนการทดสอบเท่านั้น เช่นเดียวกับการทดสอบทางคลินิก ส่วนใหญ่จำเป็นต้องมีการสอบเทียบมาตรฐานของสภาพแวดล้อมการทดสอบอุปกรณ์และสิ่งกระตุ้นก่อนที่จะดำเนินการทดสอบ (อ้างอิงถึง ISO, ANSI หรือหน่วยงานกำหนดมาตรฐาน) การตรวจวัดเสียงแบบ Pure-tone จะวัดเฉพาะเกณฑ์ความสามารถในการได้ยินเท่านั้นแทนที่จะเป็นด้านอื่น ๆ ของการได้ยิน เช่น การแปลเสียงและการรู้จำเสียง อย่างไรก็ตามมีประโยชน์ในการใช้การตรวจการได้ยินด้วย Pure-tone มากกว่าการทดสอบการได้ยินรูปแบบอื่น ๆ เช่น การตอบสนองของก้านสมองด้วยการคลิก (ABR) การตรวจวัดเสียงแบบ Pure-tone ให้เกณฑ์เฉพาะของหูและใช้ความถี่เฉพาะ Pure-tone เพื่อตอบสนองที่เฉพาะเจาะจงเพื่อให้สามารถระบุการกำหนดค่าของการสูญเสียการได้ยินได้ เนื่องจากการตรวจทางเสียงด้วย Pure-tone ใช้ทั้งการตรวจทางเสียงด้วยอากาศและการนำกระดูก นอกจากนี้ยังสามารถระบุประเภทของการสูญเสียได้ผ่านช่องว่างระหว่างกระดูกของอากาศ แม้ว่าการตรวจเสียงด้วย Pure-tone ล้วนจะมีประโยชน์ทางคลินิกมากมาย แต่ก็ไม่ได้สมบูรณ์แบบในการระบุความสูญเสียทั้งหมด เช่น "บริเวณที่ตายแล้ว" ของประสาทหูและเส้นประสาท เช่น ความผิดปกติของการประมวลผลการได้ยิน (APD) สิ่งนี้ทำให้เกิดคำถามว่า ออติโอแกรมทำนายระดับการรับรู้ของคนที่การได้ยินได้อย่างแม่นยำหรือไม่ [44]

มาตรฐานขั้นตอนการตรวจการได้ยินเสียงด้วย Pure-tone เป็นมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศเพื่อกำหนดมาตรฐาน (ISO) ในปัจจุบันสำหรับการตรวจวัดเสียงแบบ Pure-tone คือ ISO: 8253-1 ซึ่งตีพิมพ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2526 มาตรฐาน American National Standards Institute (ANSI) ในปัจจุบันสำหรับการตรวจเสียงด้วยโทนสีล้วนคือ ANSI / ASA S3.21-2004 ซึ่งจัดทำโดย Acoustical Society of America

ในสหราชอาณาจักร The British Society of Audiology (BSA) มีหน้าที่ในการเผยแพร่ขั้นตอนที่แนะนำสำหรับการตรวจเสียงด้วย Pure-tone รวมถึงกระบวนการทางโสตสัมผัสอื่น ๆ ขั้นตอนที่อังกฤษแนะนำเป็นไปตามมาตรฐานสากล แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันบ้าง แต่ขั้นตอนที่แนะนำโดย BSA นั้นเป็นไปตามมาตรฐาน ISO: 8253-1 ขั้นตอนที่แนะนำโดย BSA จัดให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มีการทดสอบโปรโตคอล แนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุด สำหรับมืออาชีพในการปฏิบัติเพื่อเพิ่มความถูกต้อง และอนุญาตให้มีการกำหนดมาตรฐานของผลลัพธ์ทั่วสหราชอาณาจักร [8]

ใน สหรัฐอเมริกา American Speech – Language – Hearing Association (ASHA) ได้เผยแพร่แนวทางปฏิบัติสำหรับการตรวจวัดระดับเสียงแบบกำหนดเองโดยใช้ Pure-Tone Threshold ในปี 2548 [44]

### 2.9.1 ลำดับในการทดสอบ (Test order)

เริ่มต้นการทดสอบด้วยหูข้างที่มีการได้ยินที่ดีกว่า ที่ 1000 Hz จากนั้นทำการทดสอบ ที่ 2000, 3000, 4000, 6000, 8000 และ 500 Hz ตามลำดับ และทดสอบที่ 1kHz อีกครั้ง (เฉพาะหูข้างแรกที่ทำทดสอบ) ทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบด้วย 1 kHz ครั้งแรก ต้องต่างกันไม่เกิน 5 dB ให้เลือกใช้ค่าที่น้อยกว่า แต่ถ้าเปรียบเทียบแล้วต่างกันเกิน 5 dB ต้องตรวจสอบว่าหูมีการได้ยินผิดปกติหรือไม่และตัวผู้ทดสอบควรจะได้รับ การทดสอบใหม่ตั้งแต่ต้นอีกครั้ง ผลลัพธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบผิดปกติจะถูกบันทึกใน audiogram จากนั้นให้ทำการทดสอบหูอีกข้างด้วยวิธีเดียวกันและลำดับเดียวกัน โดยปกติแล้วหูข้างที่ 2 นี้ ไม่จำเป็นต้องทดสอบซ้ำที่ 1 kHz แต่ถ้าหูข้างแรกที่ทำทดสอบมีความผิดปกติให้ทดสอบหูข้างที่ 2 ที่ 1 kHz อีกครั้ง

### 2.9.2 ระยะเวลาของการทดสอบกับสิ่งเร้า

ระยะห่างของระยะเวลาที่เสียงแต่ละความถี่จะถูกปล่อย ออกมา จะอยู่ที่ 1-3 วินาที และระยะเวลาที่เล่นเสียงจะอยู่ที่ 1-3 วินาที เช่นกัน โดยที่ระยะห่างของแต่ละความถี่กับความนานของเสียงที่เล่นต้องไม่เท่ากัน เพื่อให้ได้ผลทดสอบที่แม่นยำ นอกจากนี้ผู้ทดสอบห้ามหยุดการทดสอบระหว่างทำการทดสอบ

### 2.9.3 การทำความคุ้นเคยก่อนทำการทดสอบ

การทำความคุ้นเคยก่อนทำการทดสอบเป็นการทำความคุ้นเคยกับการทดสอบ โดยดำเนินการสร้างสัญญาณเสียงที่ความถี่ 1 kHz ในระดับที่ผู้ทดสอบได้ยินชัดเจน เช่น 40 dBHL สำหรับผู้ที่มีการได้ยินปกติหรือสูงกว่าเกณฑ์ปกติขึ้นมา 30 dB สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินค่อยๆเพิ่มเสียงไปที่ละ 10 dB แต่ไม่เกิน 80 dBHL ถ้าถึง 80 dBHL แล้วยังไม่ได้ยินให้เพิ่มทีละ 5 dB จนกว่าจะได้ยิน และต้องทำการตรวจสอบอุปกรณ์ที่อาจทำให้ผู้ทดสอบไม่ได้ยินเสียง

หากผลทดสอบที่ได้สอดคล้องกับสัญญาณเสียงที่สร้างออกมา แสดงว่า ผู้ทดสอบคุ้นเคยกับการทดสอบ ถ้าไม่สอดคล้องให้ทำอีกครั้งและถ้ายังไม่สอดคล้องอีกให้กลับไปตั้งค่าระดับสัญญาณเสียงที่ความถี่ 1 kHz อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.9.4 วิธีการหาค่า threshold เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว

- 1) ให้ค่อยๆลดเสียงลงมาทีละ 10 dB จนกระทั่งไม่ได้ยินเสียง
- 2) เพิ่มทีละ 5 dB จนได้ยินเสียง
- 3) หลังจากนั้นทำ 1-2 ซ้ำอีกครั้ง
- 4) ทำ 3 ไปเรื่อยจนได้ผลตอบสนองที่ตรงกัน 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป นี่คือ threshold ของการได้ยิน
- 5) จากนั้นเปลี่ยนความถี่ โดยเริ่มจากระดับเสียงที่ได้ยินชัดเจน และทำ 4 ซ้ำ [45]

### 2.10 มาตรฐาน ISO: 8253-1

มาตรฐาน ISO: 8253-1 เสียงรบกวนรอบข้างที่อนุญาตได้ตกลงข้อกำหนดกันในระดับสากลเกี่ยวกับระดับความดันเสียงรอบข้างสูงสุดที่อนุญาต ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับการตรวจการได้ยินทั้งการนำอากาศและกระดูก ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลโดยสรุปของระดับความดันสูงสุดของ permissible ambient sound ( $L_{max}$ ) หนึ่งในสามของ octave band สำหรับเกณฑ์การนำเสียงผ่านอากาศ (Air-conduction audiometry) ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 0 dB จนถึง 0 dB โดยใช้หูฟังแบบ supra-aural เพื่อความสะดวกตารางที่ 2.1 แสดงเป็นแบบเต็ม octave

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลโดยสรุปของระดับความดันสูงสุดของ permissible ambient sound ( $L_{max}$ ) แบบเต็ม octave สำหรับ Air-conduction audiometry

Octave band center frequency (Hz)	Max permissible sound pressure level $L_{max}$ (Reference 20 $\mu Pa$ ) (dB)		
	Test tone frequency range (Hz)		
	125 to 8k	250 to 8k	500 to 8k
31.5	56	62	73
63	38	48	59
125	23	30	47
250	18	18	33
500	18	18	18
1 kHz	20	20	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Octave band center frequency (Hz)	Max permissible sound pressure level $L_{max}$ (Reference $20 \mu Pa$ ) (dB)		
	Test tone frequency range (Hz)		
	125 to 8k	250 to 8k	500 to 8k
2 kHz	27	27	27
4 kHz	34	34	34
8 kHz	33	33	33

หมายเหตุ ใช้ค่าในตารางที่ 2.1 +2 dB เนื่องจากสัญญาณรบกวนโดยรอบ ถ้าค่าเกณฑ์ของความไม่แน่นอน +5 dB เป็นค่าที่ยอมรับได้ ค่า  $L_{max}$  ในตารางที่ 2.1 อาจเพิ่มขึ้น 8 dB

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการใช้หูฟังแบบ supra-aural ให้การลดทอนโดยรอบเพียงเล็กน้อย ถ้าต้องการการลดทอนที่เพิ่มขึ้นให้เปลี่ยนมาใช้หูฟังแบบ headset

พิจารณากรณีที่ต้องทำการทดสอบทางเสียงในสถานที่ที่มีสัญญาณรบกวนรอบข้างมากกว่าระดับที่ระบุไว้ใน ISO 8253 - 1 ขอแนะนำให้ใช้เสียงรบกวนโดยไม่รวมชุดหูฟังของการลดทอนที่ทราบ ควรสังเกตว่าข้อมูลการลดทอนที่มาพร้อมกับที่ปิดหูโดยปกติเมื่อใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลอาจไม่สามารถใช้งานได้ ในการใช้งานส่วนใหญ่ ที่ปิดหูจะได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อให้สามารถใส่หูฟังได้ ซึ่งอาจรวมถึงการเจาะรูเพื่อให้สามารถเดินสายระหว่างเครื่องเสียงและหูฟังได้ นอกจากนี้ ในการติดตั้งหูฟังในอาจทำให้ประสิทธิภาพการลดทอนของอุปกรณ์แตกต่างกันไปอย่างมาก

สำหรับตัวอย่างปัจจุบัน พิจารณาว่ามีการให้ชุดหูฟังซึ่งประกอบด้วยหูฟังที่ติดตั้งอยู่ในเสียงรบกวนทั่วไปโดยไม่รวมที่ปิดหู ลักษณะการลดทอนโดยทั่วไปของที่ปิดหูกันหนาว ใช้ในลักษณะดังกล่าว กำหนดโดยผู้ผลิตและมีการระบุไว้ในตารางที่ 2.2 [46]

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าลดทอนความดัน Permissible ambient noise

O/B center frequency (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mean attenuation (dB)	8	13	25	34	29	30	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.11 ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

แอนดรอยด์ (อังกฤษ: Android) เป็นระบบปฏิบัติการที่มีพื้นฐานอยู่บนลินุกซ์ ในอดีตถูกออกแบบมาสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้จอสัมผัส เช่นสมาร์ทโฟน และแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันได้แพร่ไปยังอุปกรณ์หลายชนิดเพราะเป็นมาตรฐานเปิด เช่น Nikon S800C กล้องดิจิทัลระบบแอนดรอยด์ หม้อหุงข้าว Panasonic ระบบแอนดรอยด์ และ Smart TV ระบบแอนดรอยด์ รวมถึงกล่องเสียบต่อ TV ทำให้สามารถใช้ระบบแอนดรอยด์ได้ด้วย Android Wear นาฬิกาข้อมือระบบแอนดรอยด์ เป็นต้น

### 2.11.1 หน้าตาของระบบ

ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (user interface) ของแอนดรอยด์ มีพื้นฐานอยู่บน Direct manipulation ซึ่งจะใช้การสัมผัสที่สอดคล้องกับการกระทำในโลกความจริง เช่นการปิด, การแตะ, การกวาดนิ้ว รวมไปถึงการใช้นิ้วหมุนบนหน้าจอ การตอบสนองการสัมผัสนี้ ได้รับการออกแบบมาอย่างดี และมักจะใช้การสั้นของอุปกรณ์ตอบโต้ว่าผู้ใช้ได้สัมผัสแล้ว ฮาร์ดแวร์เพิ่มเติมภายในเช่น เซ็นเซอร์ทิศทาง, ไจโรสโคป และ เซ็นเซอร์วัดแสง จะได้รับการนำมาใช้เพิ่มเติมในการตอบสนองต่างๆ กับผู้ใช้ เช่นการหมุนหน้าจอจากแนวตั้งเป็นแนวนอน หรือการเล่นเกมที่ต้องใช้การหมุนอุปกรณ์ เป็นต้น

อุปกรณ์แอนดรอยด์จะบูตเข้าหน้าหลัก ซึ่งเป็นหน้าจอหลักในการนำทางไปทุกๆ ที่ในอุปกรณ์ เหมือนกับเดสก์ท็อป บนเครื่องคอมพิวเตอร์ หน้าจอหลักของแอนดรอยด์จะสามารถวางไอคอนของแอปพลิเคชันและวิดเจ็ต โดยไอคอนของแอปพลิเคชันนั้นสามารถแตะเพื่อกดเข้าแอปพลิเคชันได้โดยตรง, สภาพอากาศและพยากรณ์อากาศที่อัปเดตอยู่ตลอดเวลา, กล่องขาเข้าของอีเมล รวมไปถึงหน้าจอข่าวด้วย หน้าจอหลักสามารถสร้างได้หลายหน้า โดยผู้ใช้สามารถปิดเพื่อเลื่อนไป-มา ระหว่างหน้าได้ แม้ว่าหน้าจอหลักของแอนดรอยด์ที่จะสามารถให้ผู้ใช้สามารถปรับแต่งได้ตามต้องการ เพื่อที่จะให้ผู้ใช้รู้สึกดีตามรสนิยมของตนเอง แอปพลิเคชันอื่นๆ มีให้ดาวน์โหลดบนกูเกิล เพลย์ และแอปหลายตัวสามารถที่จะเปลี่ยนรูปแบบหรือธีม ของหน้าจอหลักได้ แม้กระทั่งการเปลี่ยนหน้าจอเลียนแบบระบบปฏิบัติการอื่นๆ เช่น วินโดวส์โฟน ผู้ผลิตต่างๆ และ ผู้ให้บริการเครือข่ายบางราย จะปรับแต่งให้หน้าตาของหน้าจอหลักเปลี่ยนไปจากเดิม เพื่อให้แตกต่างจากคู่แข่งของพวกเขา

ด้านบนของหน้าจอจะเป็นแถบสถานะ ซึ่งจะแสดงถึงข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับอุปกรณ์ และการเชื่อมต่อต่างๆ แถบสถานะสามารถดึงลงมาเพื่อที่จะแสดงการแจ้งเตือนบนหน้าจอเมื่อแอปพลิเคชันแจ้งเตือนข้อมูลหรือมีอัปเดต เช่นการได้รับข้อความใหม่ ในรุ่นก่อนๆ ของแอนดรอยด์สามารถแตะที่การแจ้งเตือนเพื่อเปิดแอปพลิเคชันได้โดยตรง แต่รุ่นล่าสุดได้เพิ่มคุณสมบัติการทำงานที่มากขึ้น เช่นความสามารถในการโทรกลับจากการแจ้งเตือนสายที่ไม่ได้รับโดยไม่ต้องเปิดแอปโทรศัพท์ การแจ้งเตือนจะหายไปเมื่อผู้ใช้อ่าน หรือ ทำการลบการแจ้งเตือน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.11.2 แอปพลิเคชัน (โปรแกรมประยุกต์)

แอนดรอยด์มีแอปพลิเคชันที่เติบโตขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งผู้ใช้สามารถซื้อและดาวน์โหลดได้จากกูเกิล เพลย์หรือแอมะซอน แอปสโตร์ และสามารถที่จะดาวน์โหลดไฟล์ APK ได้จากเว็บไซต์ต่างๆ แอปพลิเคชันจากเพลย์สโตร์อนุญาตให้ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด และอัปเดตได้จากกูเกิลและนักพัฒนาที่พัฒนาแอปนั้นๆ รวมไปถึงความสามารถในการติดตั้งกับอุปกรณ์ที่สามารถเข้ากันได้กับแอปพลิเคชัน ซึ่งนักพัฒนาอาจจำกัดด้วยเหตุผลทางด้านอุปกรณ์, ประเทศหรือเหตุผลทางธุรกิจ เมื่อซื้อแอปแล้วสามารถขอคืนเงินได้ภายใน 15 นาที หลังจากการดาวน์โหลด และบางผู้ให้บริการจะเก็บเงินด้วยใบเสร็จจากการซื้อแอปบนกูเกิล เพลย์ ซึ่งจะคิดเงินเพิ่มเติมจากค่าใช้จ่ายรายเดือนปกติ ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2555 แอปพลิเคชันสำหรับแอนดรอยด์มีมากถึง 675,000 แอป และมียอดดาวน์โหลดแอปพลิเคชันจากเพลย์สโตร์ทั้งหมด 2.5 พันล้านครั้ง

แอปพลิเคชันจะเขียนโดยใช้ภาษาจาวา และใช้แอนดรอยด์ซอฟต์แวร์เดเวลอปเมนต์คิต (Android software development kit) หรือ SDK โดยเอสดีเคจะประกอบด้วยชุดเครื่องมือต่างๆ นานาในการพัฒนาแอปพลิเคชัน รวมไปถึงตัวรีบัก, แหล่งรวมซอฟต์แวร์ต่างๆ, ตัวจำลองแฮนด์เซต, โคดจำลอง และวิธีใช้ต่างๆ

ส่วนในประเทศจีนนั้น จะมีการจำกัดการใช้อินเทอร์เน็ตต่างๆ ของทางรัฐ โดยอุปกรณ์แอนดรอยด์ที่วางขายในประเทศจีนนั้นจะถูกจำกัดบริการบางอย่าง และ จะมีเพียงแค่อุปกรณ์ที่ได้รับอนุมัติจากรัฐบาลเท่านั้น

### 2.11.3 การจัดการหน่วยความจำ

อุปกรณ์แอนดรอยด์นั้นจะมีการใช้งานแบตเตอรี่ ทำให้แอนดรอยด์ได้รับการออกแบบเพื่อจัดการหน่วยความจำ หรือ แรม สำหรับการใช้งานที่น้อยที่สุด ในทางตรงข้ามกับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ ซึ่งจะมีพลังงานให้ใช้ได้อย่างไม่จำกัด เมื่อแอปพลิเคชันของแอนดรอยด์ไม่ได้ใช้งาน ระบบจะจัดการจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำ (เมื่อเปิดแอปพลิเคชันทิ้งไว้ในการใช้งาน)

แอนดรอยด์จะจัดการแอปพลิเคชันในหน่วยความจำอัตโนมัติ ซึ่งเมื่อแรมเหลือน้อย ระบบจะจัดการปิดแอปพลิเคชันและบริการต่างๆ ที่กำลังทำงานอยู่ทันที โดยกระบวนการนี้ผู้ใช้จะไม่สามารถมองเห็นมันได้ อย่างไรก็ตามจะมีแอปพลิเคชันบนกูเกิล เพลย์ ที่จะสามารถจัดการและปิดแอปพลิเคชันได้ ซึ่งคาดกันว่าให้ผลร้ายมากกว่าผลดี [47]

### 2.11.4 ข้อดีของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

เนื่องจากระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีส่วนแบ่งตลาดของอุปกรณ์ด้านนี้ ขึ้นทุกขณะ ทำให้กลุ่มผู้ใช้งาน และกลุ่มนักพัฒนาโปรแกรม ให้ความสำคัญกับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อมองในด้านของกลุ่มผลิตภัณฑ์ บริษัทที่มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ ได้มีการนำเอาระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ไปใช้ในสินค้าของตนเอง พร้อมทั้งยังมีการปรับแต่งให้ระบบปฏิบัติการมีความสามารถ การจัดวาง โปรแกรม และลูกเล่นใหม่ๆ ที่แตกต่างจากคู่แข่งในท้องตลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กลุ่มสินค้าที่เป็น มือถือรุ่นใหม่ (Smartphone) และอุปกรณ์จอสัมผัส (Touch Screen) โดยมีคุณลักษณะแตกต่างกันไป เช่นขนาดหน้าจอ ระบบโทรศัพท์ ความเร็วของหน่วยประมวลผล ปริมาณหน่วยความจำ แม้กระทั่งอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ(Sensor)

หากมองในด้านของการพัฒนาโปรแกรม ทางบริษัท Google ได้มีการพัฒนา Application Framework ไว้สำหรับนักพัฒนาใช้งาน ได้อย่างสะดวก และไม่เกิดปัญหาเมื่อนำชุดโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ไปใช้กับอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะต่างกัน เช่นขนาดจออุปกรณ์ ไม่เท่ากัน ก็ยังสามารถใช้งานโปรแกรมได้เหมือนกัน เป็นต้น [48]

## 2.12 โปรแกรม Android studio

Android Studio เป็น IDE Tool จาก Google ไว้พัฒนา Android สำหรับ Android Studio เป็น IDE Tools ล่าสุดจาก Google ไว้พัฒนาโปรแกรม Android โดยเฉพาะ โดยพัฒนาจากแนวคิดพื้นฐานมาจาก IntelliJ IDEA คล้าย ๆ กับการทำงานของ Eclipse และ Android ADT Plugin โดยวัตถุประสงค์ของ Android Studio คือ ต้องการพัฒนาเครื่องมือ IDE ที่สามารถพัฒนา App บน Android ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งด้านการออกแบบ GUI ที่ช่วยให้สามารถ Preview ตัว App มุมมองที่แตกต่างกันบน Smart Phone แต่ละรุ่น สามารถแสดงผลบางอย่างได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการรัน App บน Emulator รวมทั้งยังแก้ไขปรับปรุงในเรื่องของความเร็วของ Emulator ที่ยังเจอปัญหาทำกันอยู่ในปัจจุบัน

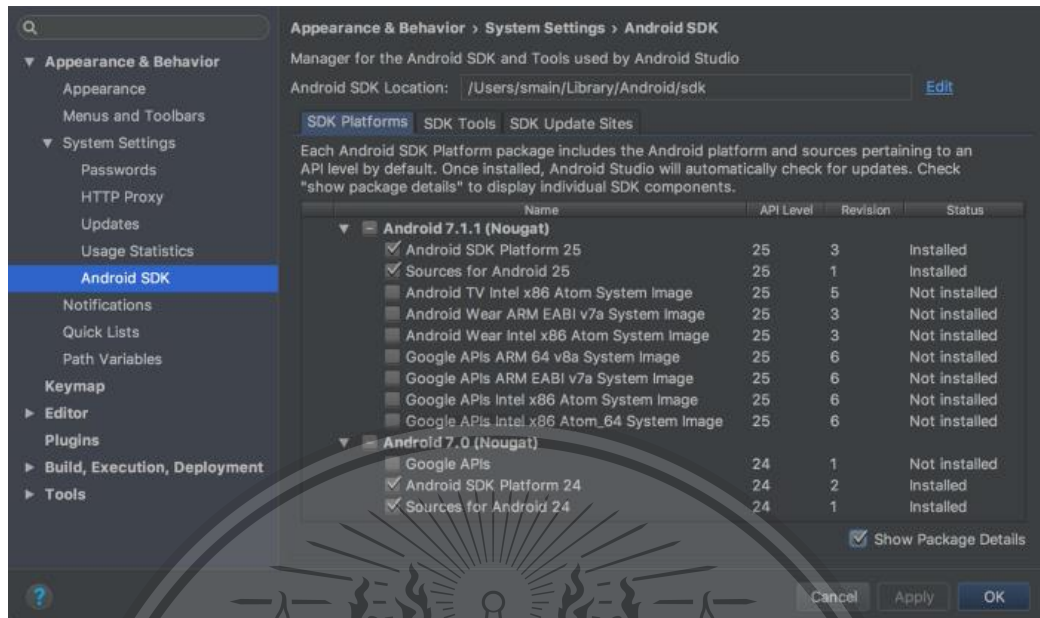
### 2.12.1 Android SDK

Android Software Development Kit (Android SDK) เปรียบเสมือน Library ที่ใช้ในการพัฒนา Application สำหรับ Android เนื่องจากตัว Android มีหลายเวอร์ชันและแต่ละเวอร์ชันมี Feature, GUI ที่ไม่เหมือนกันทำให้เกิด Android SDK ออกมาหลายเวอร์ชันให้เลือกใช้งาน ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.13 หน้าต่าง Android SDK

### 2.12.2 API Level

API Level หมายถึง เวอร์ชันของ API ที่ให้นักพัฒนามาใช้งานใน SDK เวอร์ชันนั้นๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ Android 8 ก็จะสามารถใช้งาน API Level 26 ซึ่งอาจจะมี Feature ใหม่ๆ เพิ่มขึ้นมา ทำให้มือถือที่ใช้ Android เวอร์ชันเก่ากว่านี้จะไม่สามารถใช้งาน API Level นี้ได้ ดังรูปที่ 2.14

Name	API Level	Revision	Status
<input checked="" type="checkbox"/> Android API 27	27	1	Update available
<input checked="" type="checkbox"/> Android 8.0 (Oreo)	26	2	Installed
<input checked="" type="checkbox"/> Android 7.1.1 (Nougat)	25	3	Installed
<input type="checkbox"/> Android 7.0 (Nougat)	24	2	Not installed
<input type="checkbox"/> Android 6.0 (Marshmallow)	23	3	Not installed
<input type="checkbox"/> Android 5.1 (Lollipop)	22	2	Not installed
<input type="checkbox"/> Android 5.0 (Lollipop)	21	2	Not installed

รูปที่ 2.14 API Level

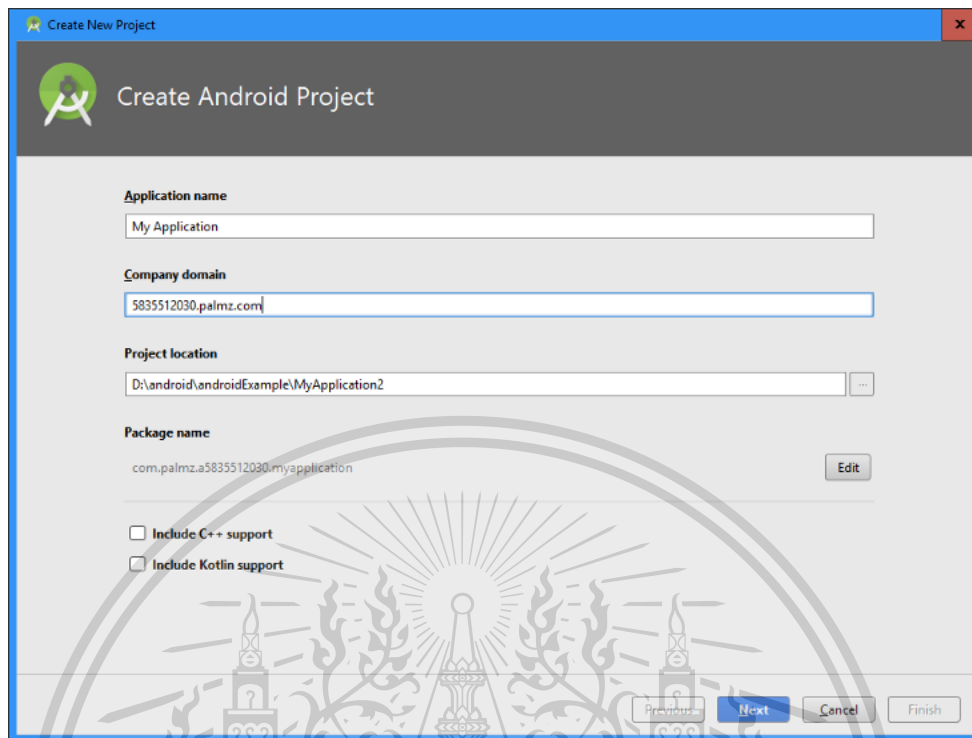
### 2.12.3 การใช้งาน Android Studio เบื้องต้น

หลังจากติดตั้ง Android Studio เสร็จและดาวน์โหลด SDK เรียบร้อยแล้ว (SDK จะถูกดาวน์โหลดให้อัตโนมัติหลังจากติดตั้ง Android Studio หรือสามารถจัดการ SDK ได้ในเมนู SDK Preferences) เริ่มต้นสร้างแอปพลิเคชันโดยการ Create New Project ขึ้นมา จะปรากฏหน้าต่างเอกสารนี้เป็น ดังรูปที่ 2.15 วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 หน้าต่าง Create New Project

จากรูปที่ 2.15 จะประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนของ Application Name ใส่ชื่อแอปพลิเคชันที่เราต้องการ, ส่วนที่สองจะเป็นส่วนของ Company Domain ใส่โดเมนอะไรก็ได้ของเรา (ตรงนี้สำคัญเพราะถ้าหากซ้ำกับของผู้อื่นจะไม่สามารถนำลง Play Store ได้ แต่ถ้าพัฒนาแอปเพื่อใช้เองไม่ได้ต้องการนำลง Play Store ก็ไม่มีปัญหาใดๆ) ในส่วนที่สามจะเป็นส่วนของ Project Location ไดรฟ์คอร์ดที่ต้องการเก็บไฟล์ไว้ และในส่วนที่สี่จะเป็นส่วนของ Include C++/Kotlin Support ทำให้โปรเจกต์สามารถใช้งานภาษา C++, Kotlin ได้ ซึ่งอาจจะช่วยอำนวยความสะดวกมากยิ่งขึ้น แต่ในปริญญานิพนธ์นี้จะทดลองสร้างโดยใช้ภาษา Java แล้วคลิก Next จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Target Android Devices ดังรูปที่ 2.16

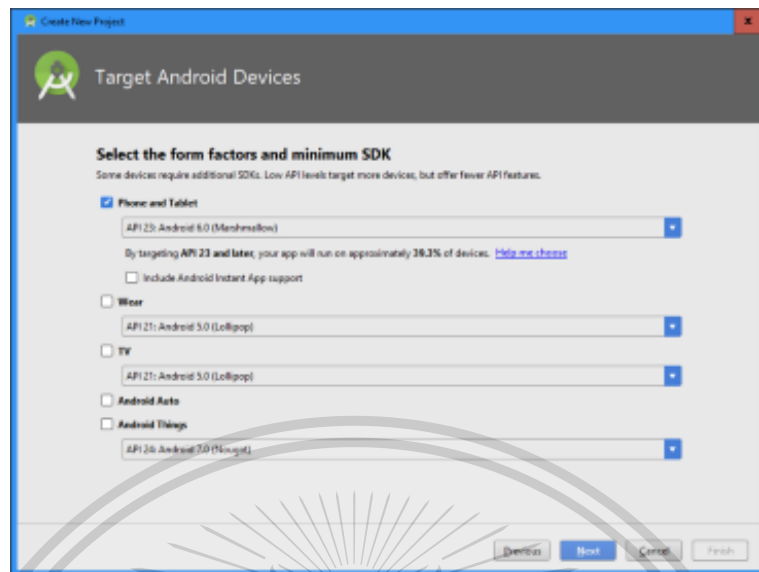
จากรูปที่ 2.16 จะเป็นการเลือกแพลตฟอร์มที่ต้องการให้แอปพลิเคชันรันได้ ในปริญญานิพนธ์นี้เลือกเป็น Phone and Tablet เนื่องจากจะเน้นใช้งานแค่มือถือและแท็บเล็ต เลือก Android API เวอร์ชัน 23 สำหรับใช้กับ Android 6.0 (Marshmallow) เนื่องจากเป็นเวอร์ชันที่ค่อนข้างเสถียร

หลังจากเลือก Android API แล้วด้านล่างจะมีบอกว่าจำนวนผู้ใช้งาน Android ก็เปอร์เซ็นต์จากทั้งหมดบนโลกที่กำลังใช้งาน Android Version นี้และสามารถรันแอปพลิเคชันนี้ได้ จากนั้นคลิก Next จะปรากฏหน้าต่างในเลือกรูปแบบหน้าต่างของแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 2.17

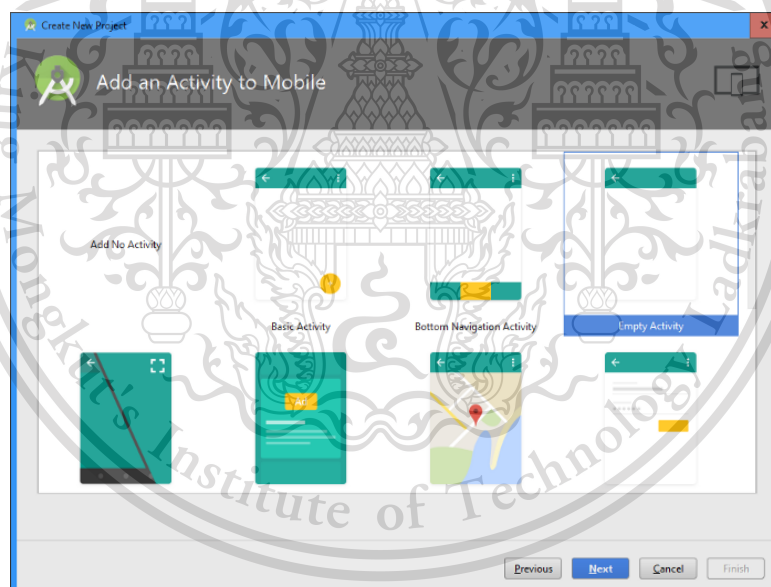
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.16 หน้าต่าง Target Android Devices



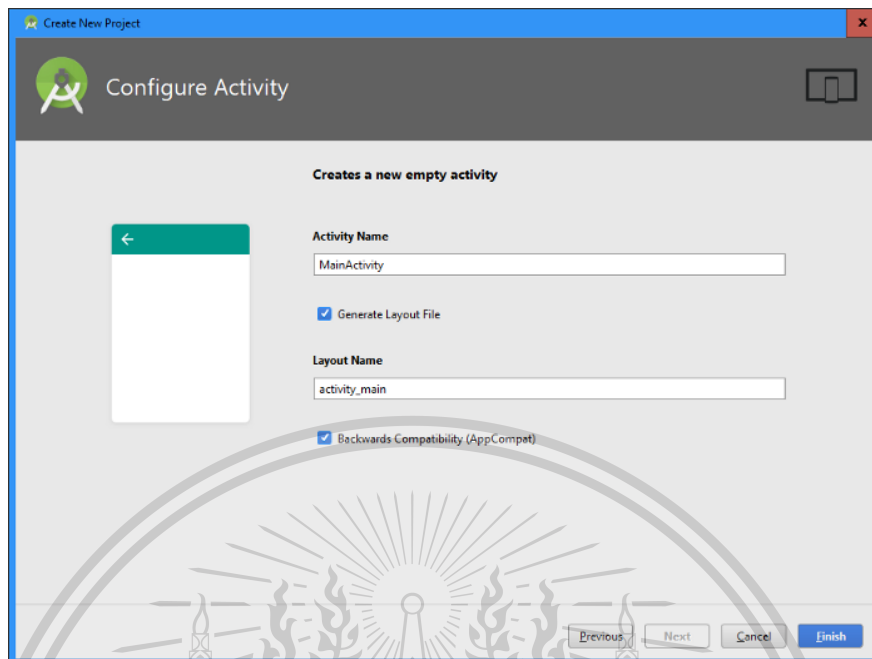
รูปที่ 2.17 หน้าต่าง Add an Activity to Mobile

จากรูปที่ 2.17 จะเป็นการเลือกรูปแบบ Activity ที่ต้องการใช้งาน (Activity ก็เปรียบเสมือน Class GUI ของแอปพลิเคชัน) จากนั้นคลิก Next จะปรากฏหน้าต่าง Configuration Activity ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.18 หน้าต่าง Configuration Activity

จากรูปที่ 2.18 ให้ใส่ชื่อ Activity, ชื่อ Layout หลักของแอป (ตรงนี้ปล่อยเป็นค่า Default ได้) จากนั้นคลิก Finish จะปรากฏหน้าต่างของ project เพื่อทำการออกแบบ ก่อนอื่น มาทำความรู้จักในส่วนของไดเรกทอรีที่เก็บโปรเจ็ค โดยโปรเจ็คจะเก็บไว้ในโฟลเดอร์ app และแบ่ง ออกเป็น 3 เลเวล คือ manifests, java, res

1) manifests สำหรับเก็บไฟล์ .xml ที่ใช้สำหรับตั้งค่าต่างๆ ของแอปพลิเคชัน เช่น ชื่อแอป, ชื่อ Activity หลักที่จะให้เรียกใช้งานตอนรันแอปพลิเคชัน, Permission ต่างๆ ของแอป

2) java สำหรับเก็บไฟล์ .java ของแอปพลิเคชัน เป็นส่วน Controller หลักของแอป ที่ใช้ในการประมวลผล

3) res สำหรับเก็บไฟล์ .xml เพื่อใช้สร้าง GUI ของแอป และเก็บ Resource ต่างๆ เช่น รูปภาพ, สีฉิม เป็นต้น

จากนั้นมาทำความรู้จักในส่วนของ Menu หลักที่ใช้งานเป็นประจำ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 Menu หลักที่ใช้งานเป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 1) Make Project (รูปค้อนสีเขียว) สำหรับ Compile แอปพลิเคชัน
- 2) Run (รูปสามเหลี่ยมสีเขียว) สำหรับใช้ Compile แอปพลิเคชันและรันบน Emulator
- 3) Apply (รูปสายฟ้าสีเหลือง) สำหรับใช้ Compile แอปและอัปเดตแอปพลิเคชันบน Emulator (ในกรณีที่แอปรันบน Emulator อยู่แล้วให้ใช้ปุ่มนี้แทนปุ่ม Run จะเร็วกว่า)
- 4) SDK Manager (รูปลูกศรชี้ลงสีฟ้า) สำหรับใช้จัดการเวอร์ชัน SDK ในเครื่อง
- 5) AVD Manager (รูปโทรศัพท์สีม่วง) สำหรับใช้จัดการ Emulator ในเครื่อง [49]

## 2.13 ภาษาจาวา

จาวา (อังกฤษ: Java programming language) เป็นภาษาโปรแกรมเชิงวัตถุ (อังกฤษ: Object Oriented Programming) พัฒนาโดย เจมส์ กอสลิง และวิศวกรคนอื่นๆ ที่ซัน ไมโครซิสเต็มส์ ซึ่งภาษานี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้แทนภาษา C++ โดยรูปแบบที่เพิ่มเติมขึ้นคล้ายกับ ภาษา (Objective-C แต่เดิมภาษานี้เรียกว่า ภาษาโอ๊ก (Oak) ซึ่งตั้งชื่อตามต้นโอ๊กใกล้ที่ทำงานของ เจมส์ กอสลิง แต่ว่ามีปัญหาทางลิขสิทธิ์ จึงเปลี่ยนไปใช้ชื่อ "จาวา" ซึ่งเป็นชื่อกาแฟแทน

และแม้ว่าจะมีชื่อคล้ายกัน แต่ภาษาจาวาไม่มีความเกี่ยวข้องกับภาษาจาวาสคริปต์ (JavaScript) ปัจจุบันมาตรฐานของภาษาจาวาดูแลโดย Java Community Process ซึ่งเป็นกระบวนการอย่างเป็นทางการ ที่อนุญาตให้ผู้ที่สนใจเข้าร่วมกำหนดความสามารถในจาวาแพลตฟอร์มได้

### 2.13.1 จาวาแพลตฟอร์มและภาษาจาวา

เนื่องจากชื่อที่เหมือนกันและการเรียกขานที่มักจะถูกพูดถึงพร้อมกันบ่อยๆ ทำให้คนทั่วไป มักสับสนว่า ภาษาจาวาและจาวาแพลตฟอร์ม เป็นสิ่งเดียวกัน

ในความเป็นจริงนั้น ทั้งสองสิ่ง แม้จะทำงานเสริมกัน แต่ก็ยังเป็นสิ่งที่แยกออกจากกัน โดยภาษาจาวานั้น คือ ภาษาสำหรับใช้เขียนโปรแกรมภาษาหนึ่ง ดังที่ได้อธิบายไปข้างต้น ส่วนจาวาแพลตฟอร์มนั้น คือ สภาพแวดล้อมสำหรับการทำงานโปรแกรมจาวา โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ Java virtual machine และ ไลบรารีมาตรฐานจาวา (Java standard library)

โปรแกรมที่ทำงานบนจาวาแพลตฟอร์มนั้น ไม่จำเป็นต้องสร้างด้วยภาษาจาวา เช่น อาจจะใช้ ภาษา Python หรือภาษาอื่นๆก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ส่วนภาษาจาวานั้นก็สามารถนำไปใช้พัฒนาโปรแกรมสำหรับแพลตฟอร์มอื่นได้ เช่นเดียวกัน เช่น คอมไพเลอร์ gcj สามารถคอมไพล์โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาจาวาให้ทำงานได้ โดยไม่ต้องใช้ Java virtual machine [50]

### 2.13.2 หลักการทำงานของภาษา JAVA

ภาษาจาวาเป็นภาษาที่เขียนขึ้นมาครั้งเดียวและสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์หรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบต่างๆได้ ภาษาจาวาจึงเป็นที่นิยมมากขึ้น ซึ่งกระบวนการทำงานของภาษาจาวา มีดังนี้

- 1) เริ่มต้นด้วยการเขียน Source code เป็นไฟล์นามสกุล .java
- 2) คอมไพเลอร์ให้กลายเป็น Java Byte Code ที่จัดเก็บในนามสกุล .class เมื่อมีการเรียกใช้ในอุปกรณ์ต่างๆไฟล์ .class จะถูกคอมไพล์อีกครั้งให้กับอุปกรณ์นั้นๆที่ใช้เปิดให้สามารถอ่านได้แล้วแสดงผลออกมา

การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาจาวา จำเป็นต้องมีชุดพัฒนาโปรแกรมภาษาจาวาที่เรียกว่า Java Development Kit หรือ JDK [51]

### 2.13.3 องค์ประกอบ Java

Java เป็นภาษาที่มีอิสระในเรื่องของรูปแบบ หมายความว่า ในการพิมพ์ source code เราจะย่อหน้าหรือไม่ย่อหน้า จะวรรค 1 เคาะ หรือกี่เคาะ โปรแกรมก็ run ได้เหมือนเดิมทุกประการ ไม่เชื่อก็ทดลองกับโปรแกรม HelloWorld.java ดูกี่ได้! แต่ท่านควรยึดแบบแผนที่ดี (หัวข้อถัดไป)จะดีกว่า มิฉะนั้น จะไล่ดู ตรวจสอบ แก้ไขได้ลำบาก

Java มีองค์ประกอบและไวยากรณ์คล้าย C และ C++

Primitive Data Types มี boolean, byte, short, char, int, float

จงเลือกใช้ให้เหมาะสม โปรแกรมจึงจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ (รันเร็ว ไม่เปลืองเนื้อที่ฮาร์ดดิสก์ ผลลัพธ์ถูกต้องเที่ยงตรง โดยเฉพาะทศนิยมด้วย ฯลฯ)

Operators แต่ละคู่ต่อไปนี้อาจต้อง เขียน/พิมพ์ ติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

#### ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด

##### 3.1 การออกแบบ

การออกแบบ คือ การทำให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของดิจิทัลฟิลเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะ (specifications) ของดิจิทัลฟิลเตอร์ ซึ่ง FIR filter คือดิจิทัลฟิลเตอร์ชนิดหนึ่ง การออกแบบ FIR filter จึงสิ้นสุดที่การได้รับค่าสัมประสิทธิ์ โดยในการออกแบบดิจิทัลฟิลเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์กับ impulse response ถือว่าเป็นค่าเดียวกัน วิธีการออกแบบ FIR filter แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

##### 3.1.1 การออกแบบด้วยวิธี Windowing

การเริ่มต้นการออกแบบ FIR filter ด้วย Windowing สิ่งที่ต้องใช้สิ่งแรก คือ สมการที่ใช้คำนวณหา Ideal Impulse Response หรือ  $h_d(n)$  โดย Ideal Impulse Response จะสัมพันธ์กับชนิดของฟิลเตอร์ที่ต้องการสร้าง โดยแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ideal Impulse Response กับชนิดของฟิลเตอร์

Filter Type	Ideal Impulse Response หรือ $h_d(n)$	
	$h_d(n), n \neq 0$	$h_d(0)$
Lowpass	$\frac{\sin(n\omega_p)}{n\pi}$	$\frac{\omega_p}{\pi}$
Highpass	$-\frac{\sin(n\omega_p)}{n\pi}$	$1 - \frac{\omega_p}{\pi}$
Bandpass	$\frac{\sin(n\omega_{p2})}{n\pi} - \frac{\sin(n\omega_{p1})}{n\pi}$	$\frac{\omega_{p2} - \omega_{p1}}{\pi}$
Bandstop	$\frac{\sin(n\omega_{p1})}{n\pi} - \frac{\sin(n\omega_{p2})}{n\pi}$	$1 - \frac{\omega_{p2} - \omega_{p1}}{\pi}$

โดย  $\omega_p$  คือ normalized passband edge frequency มีหน่วยเป็น เรเดียน (rad) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\omega_p = \frac{2\pi f_p}{F_s} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $f_p$  คือ passband edge frequency ในหน่วย Hz ซึ่ง FIR filter จะออกแบบให้ค่า Amplitude ที่ passband edge frequency มีค่าเป็น -6 dB

และ  $F_s$  คือ sampling frequency มีหน่วยเป็น Hz

ค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ หรือ impulse response ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบนั้นเกิดจากการนำ Ideal Impulse Response มาผ่าน window function หรือเป็นการนำมาคูณกันดังสมการที่ 3.2

$$h(n) = h_d(n) * w(n) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $h(n)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ หรือ impulse response และ  $w(n)$  คือ window function โดย window function ที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 window function ที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป

Name of window function	Transition width, $\Delta f / F_s$	Peak side lobe (dB)	Maximum Stopband attenuation (dB)	Window function $w(n),  n  \leq (N-1)/2$
Rectangular	0.9/N	-13	-21	1
Hanning	3.1/N	-31	-44	$0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$
Hamming	3.3/N	-41	-53	$0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$
Blackman	5.5/N	-57	-74	$0.42 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right)$

$N$  คือ จำนวน filter length ยิ่ง filter length มากฟิลเตอร์ยิ่งมีความชันหรือความคมมาก กล่าวได้ว่า ยิ่ง filter length มากฟิลเตอร์จะมีคุณลักษณะเข้าใกล้ ideal filter มากขึ้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อได้รับค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์หรือ impulse response แล้วจึงสิ้นสุดขั้นตอนการออกแบบ อาจทำการ simulation ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อดูผลลัพธ์หากนำไปใช้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ไปแปลงฟูเรียร์เพื่อดู Frequency response ของฟิลเตอร์ที่ทำการออกแบบ

3.1.1.1 ทดลองทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ window function ต่างๆในการออกแบบ

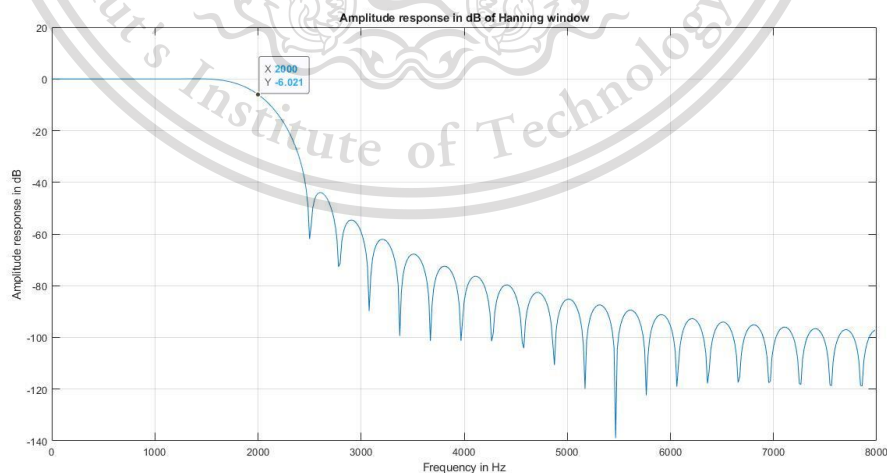
ในการออกแบบ FIR Lowpass filter กำหนดให้ filter length หรือ N เท่ากับ 53, sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz และ passband edge frequency (-6 dB) อยู่ที่ 2 kHz สามารถนำไปคำนวณหาค่า Transition Width ในตารางที่ 3.2 ได้เป็นตารางที่ 3.3 และได้ผลการออกแบบดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่า Transition Width ของแต่ละ Window Function

Name of window function	Transition width
Rectangular	272
Hanning	936
Hamming	996
Blackman	1,660

1) Hanning window

Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ passband edge frequency 2 kHz มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

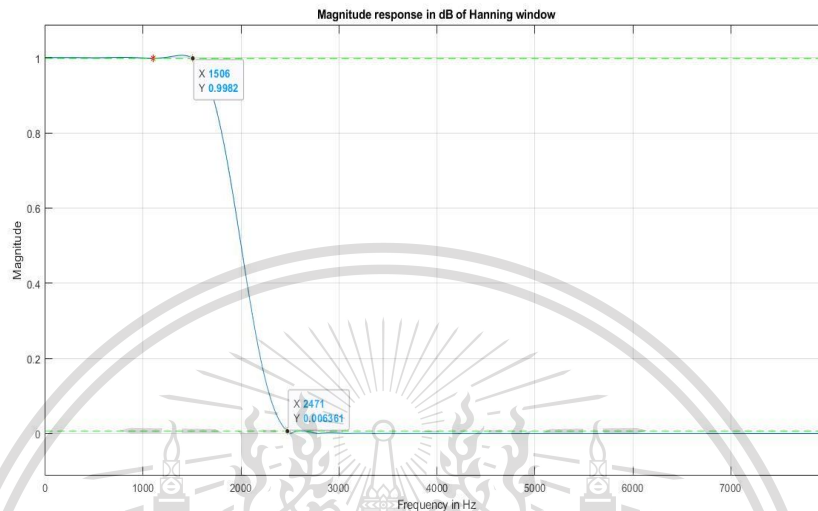
Hanning window function ในหน่วย dB

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

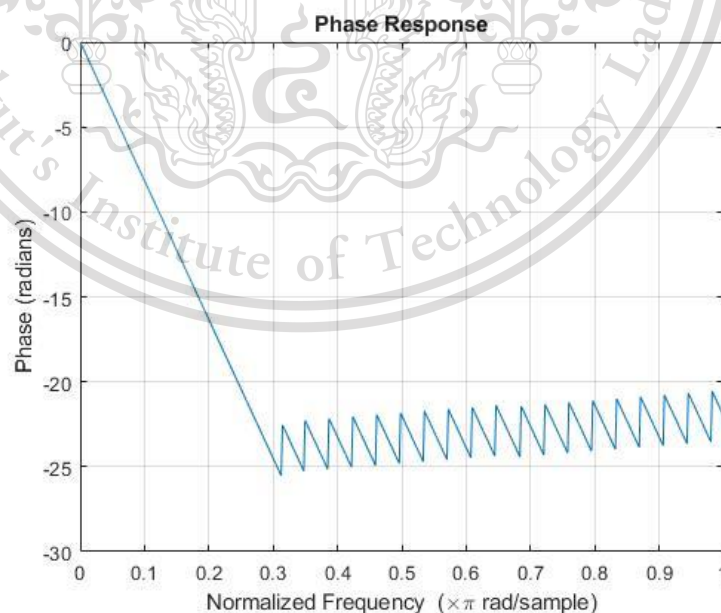
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1,506 Hz ถึง 2,471 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 965 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.2 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hanning window function

และจะได้ Phase response โดยแกนตั้งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกนนอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hanning window function

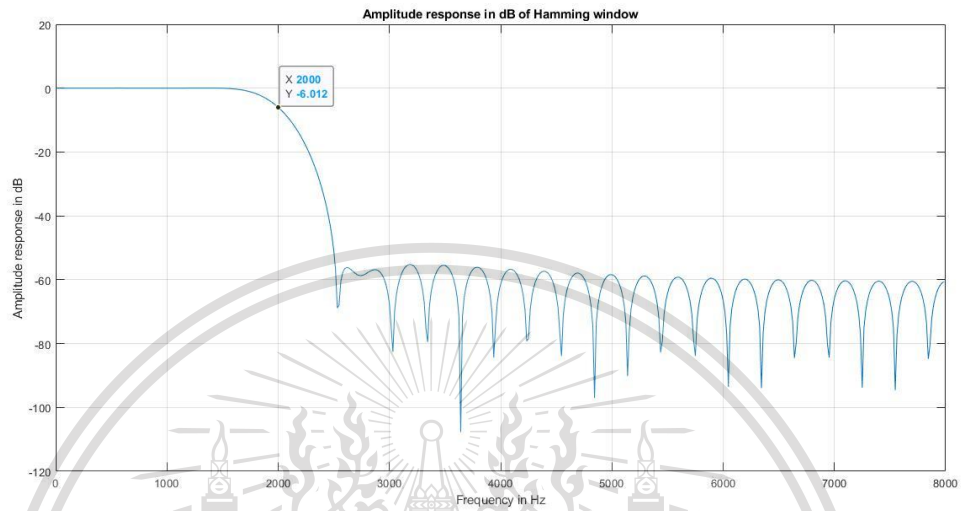
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

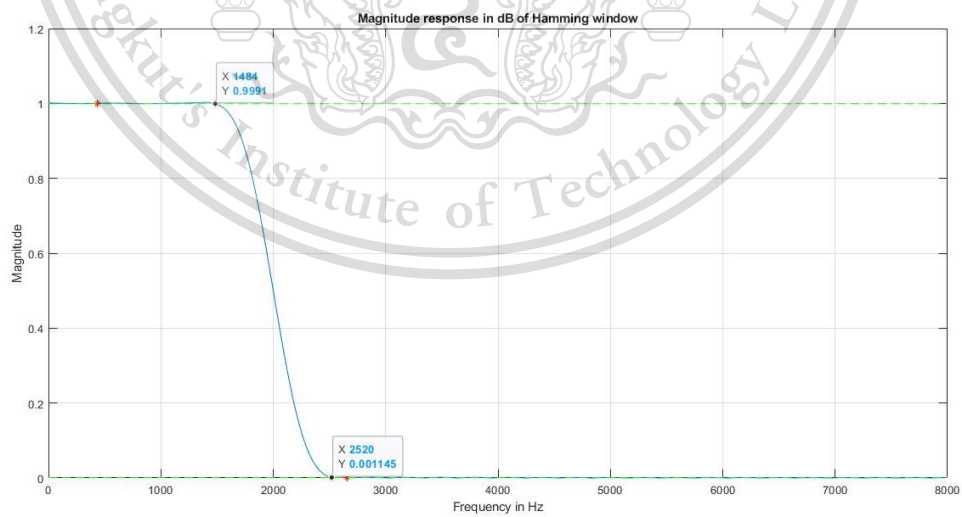
2) Hamming window

Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ passband edge frequency 2 kHz มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hamming window function ในหน่วย dB

จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1,484 Hz ถึง 2,520 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1,036 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้

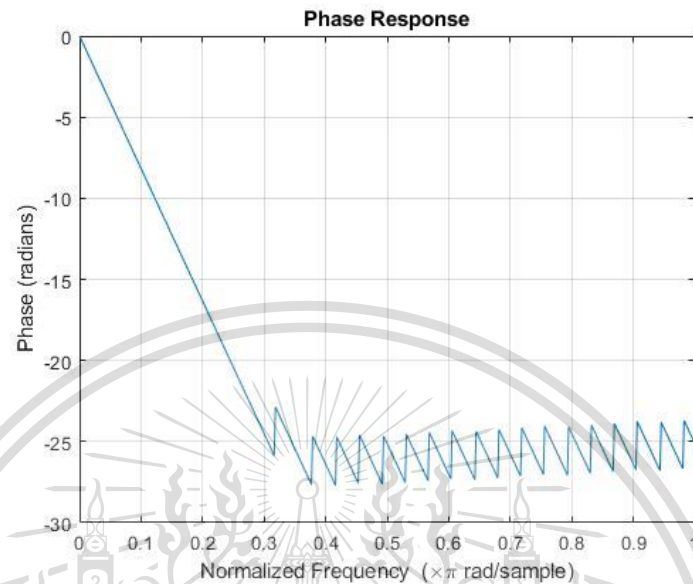
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ Hamming window function เป็นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

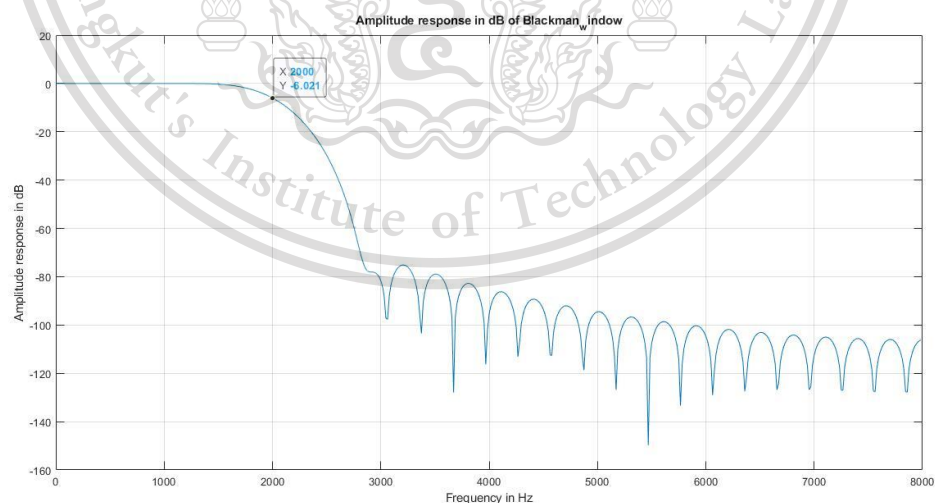
และจะได้ Phase response โดยแกนตั้งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกนนอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Hamming window function

3) Blackman window

Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ passband edge frequency 2 kHz มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้

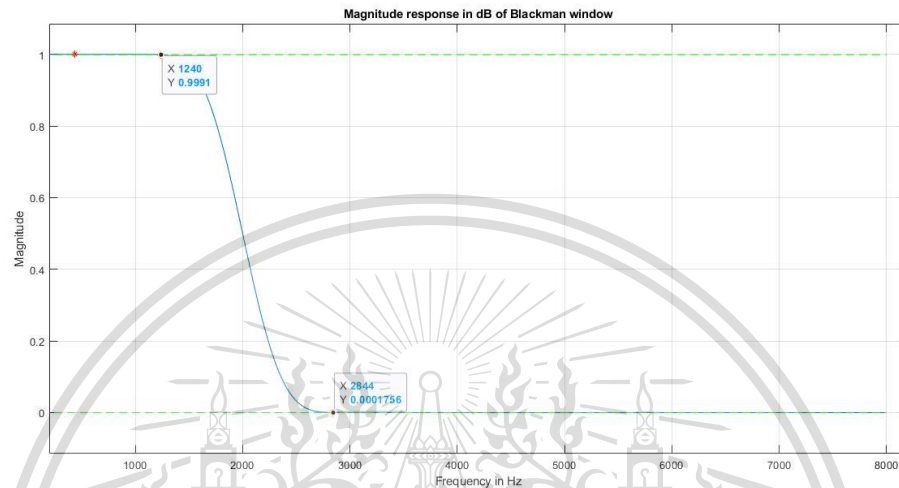
Blackman window function ในหน่วย dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

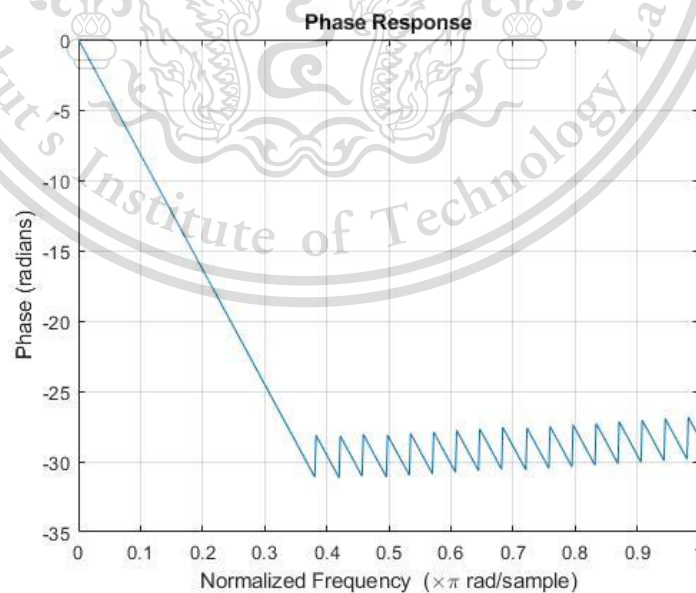
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1,240 Hz ถึง 2,844 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1,604 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากตารางที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Blackman window function

และจะได้ Phase response โดยแกนตั้งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกนนอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Blackman window function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการทดลองออกแบบ FIR lowpass filter โดยใช้ Hanning window, Hamming window และ Blackman window จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะของฟิลเตอร์ที่ออกแบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่ง window function ที่อยู่ในตารางดังกล่าวเป็นแบบ fixed window ทั้งหมดซึ่งมีผลให้การออกแบบไม่มีความยืดหยุ่น คือไม่สามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของฟิลเตอร์ที่ทำการออกแบบได้ หากต้องการออกแบบให้ฟิลเตอร์มีคุณลักษณะที่ต่างจากที่กำหนดในตารางที่ 3.2 ด้วยเหตุนี้ปริยฐานิพนธ์นี้จึงไม่เลือกใช้ window function เหล่านี้แต่จะเลือกใช้ Kaiser window ในการออกแบบ FIR Filter แทน

### 3.1.1.2 Kaiser window function

เป็น window function ที่สามารถปรับคุณลักษณะได้ หรือ Adjustable window ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาของ Fixed window ได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเกิด ripples ได้ด้วย ซึ่งปริยฐานิพนธ์นี้ใช้ในการออกแบบ FIR filter โดยสมการของ Kaiser window กำหนดดังสมการที่ 3.3

$$w(n) = \begin{cases} \frac{I_0 \left\{ \beta \left[ 1 - \left( \frac{2n}{N-1} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}}{I_0 \beta} & ; -(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2 \\ 0 & ; elsewhere \end{cases} \quad (3.3)$$

โดยค่า zero-order modified Bessel function of the first kind หรือ  $I_0(x)$  สามารถหาได้โดยใช้ power series expansion ดังสมการที่ 3.4

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^L \frac{\left( \frac{x}{2} \right)^k}{k!} ; L \rightarrow \infty \quad (3.4)$$

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า Kaiser window สามารถควบคุมการเกิด ripples ได้ซึ่งสามารถทำได้เนื่องจากมีตัวแปรที่เรียกว่า ripple control parameter,  $\beta$  โดยค่า  $\beta$  จะถูกกำหนดจากค่า Stopband attenuation ที่ต้องการ สามารถประมาณค่า  $\beta$  ได้จากความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันดังสมการที่ 3.5

$$\beta = 0 \quad \text{ถ้า } A \leq 21 \text{ dB} \quad (3.5a)$$

$$\beta = 0.5842(A-21)^{0.4} + 0.07886(A-21) \quad \text{ถ้า } 21 \text{ dB} \leq A \leq 50 \text{ dB} \quad (3.5b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\beta = 0.1102(A - 8.7) \quad \text{ถ้า } A \geq 50 \text{ dB} \quad (3.5c)$$

โดย  $A$  คือค่า stopband attenuation หาได้จากสมการที่ 3.6

$$A = -20 \log_{10}(\delta) \quad (3.6)$$

$$\text{และ } \delta = \min(\delta_p, \delta_s) \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\delta_p$  คือ passband ripple

$\delta_s$  คือ stopband ripple

จำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ หรือ filter length หาได้จากสมการที่ 3.8 ซึ่งหาค่าที่ได้เป็นเลขทศนิยมให้ปัดทศนิยมขึ้นทุกกรณี

$$N \geq \frac{A - 7.95}{14.36(\Delta f / F_s)} \quad (3.8)$$

ค่า  $\beta$  และ  $N$  จะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ Kaiser window ปริมาณนิพจน์นี้ทำการออกแบบฟิลเตอร์ 4 ประเภท โดยใช้คุณลักษณะร่วมกันดังนี้

กำหนดให้ Transition width ( $\Delta f$ ) 1.1 kHz

Sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation ( $A$ ) 60 dB

จากข้อกำหนดดังกล่าว หาค่า passband ripple และ stopband ripple ได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10 ซึ่งได้ค่า passband ripple เท่ากับ 0.0115 และค่า stopband ripple เท่ากับ 0.001

$$\delta_p (dB) = 20 \log_{10}(1 - \delta_p) \quad (3.9)$$

$$\delta_s (dB) = -20 \log_{10}(\delta_s) \quad (3.10)$$

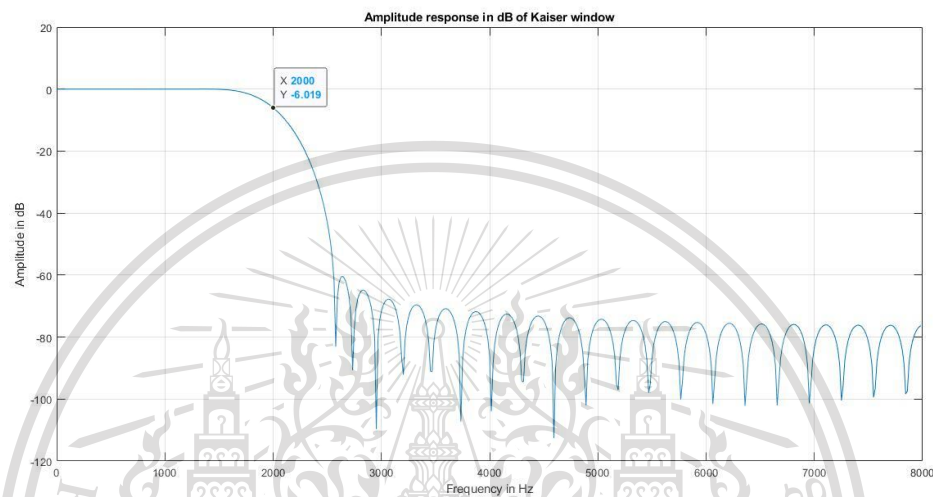
ดังนั้น จะได้ค่า  $\delta$  จากสมการที่ 3.7 เท่ากับ 0.001 ซึ่งเมื่อแทนในสมการที่ 3.6 จะได้  $A = 60 \text{ dB}$  ตรงตามเงื่อนไขสมการที่ 3.5c เมื่อนำค่า Stopband attenuation ที่ได้แทนในสมการที่ 3.5c และ สมการที่ 3.8 จะได้ค่า  $\beta$  และ  $N$  ที่ใช้สำหรับการออกแบบและคำนวณ window function,  $w(n)$  วิธีการได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ เหมือนกับการออกแบบด้วย window function คือ ให้สมการที่ 3.2 โดยจะได้ค่า  $\beta = 5.6533$  และ  $N = 53$  จากค่าตัวแปรเหล่านี้ ปริมาณนิพจน์นี้ได้ทำการออกแบบฟิลเตอร์ 4 ประเภทด้วย Kaiser window function เอกสารนี้เป็นได้ผลการออกแบบดังนี้ รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1) FIR Lowpass filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 2 kHz ซึ่งจาก Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.10



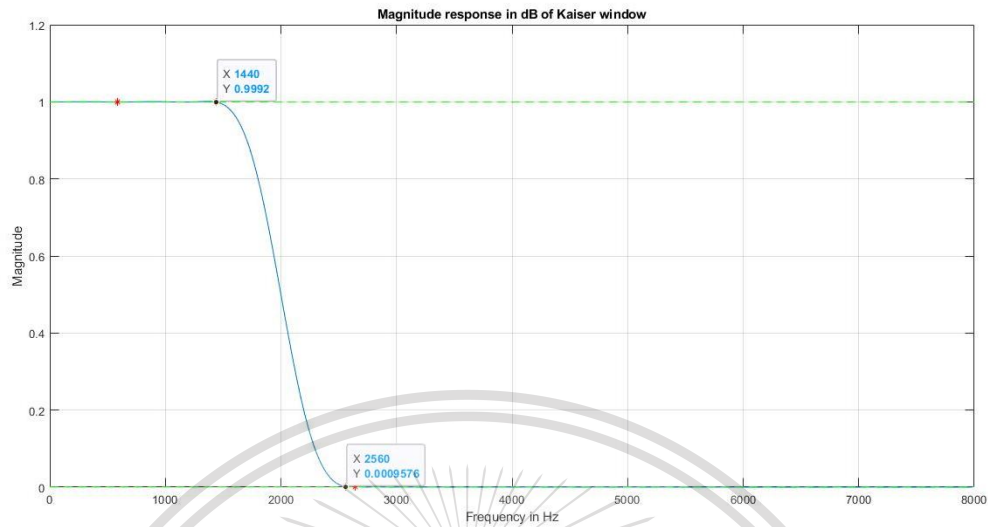
รูปที่ 3.10 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB

และจะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณส่วนที่เป็น stopband attenuation มีค่าต่ำกว่า -60 dB ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้อีกหนึ่งคุณลักษณะที่กำหนดไว้ คือ Transition width เท่ากับ 1.1 kHz ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.11 Transition width จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1,440 Hz ถึง 2,560 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1,120 Hz ใกล้เคียงกับคุณลักษณะข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

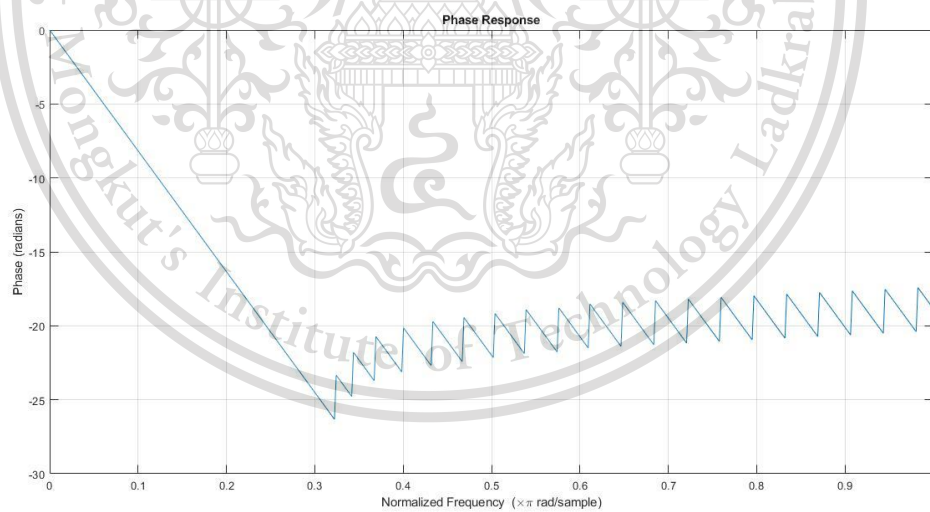
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

และจะได้ Phase response โดยแกนนั่งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกนนอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 Phase response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

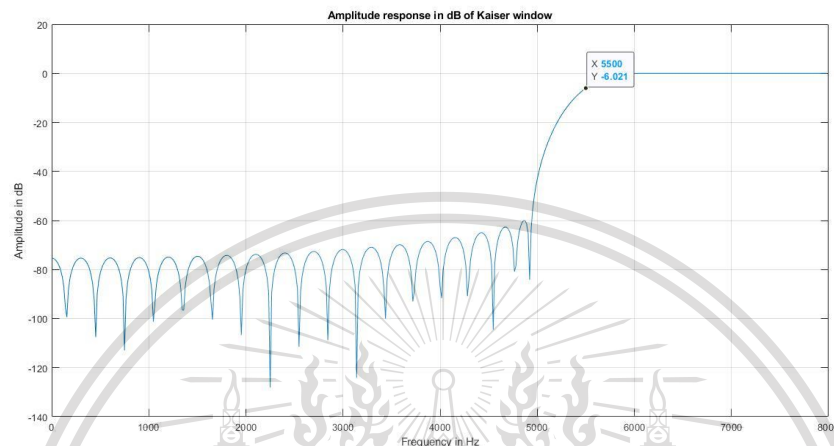
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) FIR Highpass filter

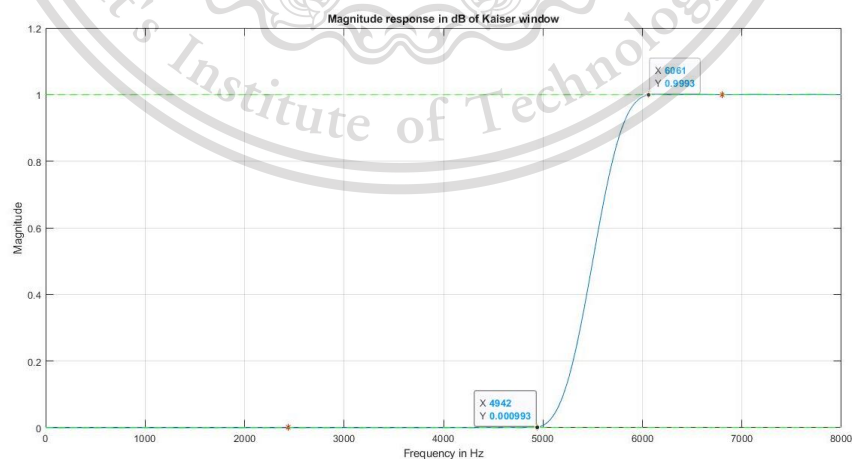
กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 5.5 kHz

ซึ่งจาก Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Amplitude response ของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB

จะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณส่วนที่เป็น stopband attenuation มีค่าต่ำกว่า -60 dB ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ อีกหนึ่งคุณลักษณะที่กำหนดไว้ คือ Transition width เท่ากับ 1.1 kHz ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.14 Transition width จะอยู่ในช่วงระหว่าง 4,942 Hz ถึง 6,061 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1,119 Hz ใกล้เคียงกับคุณลักษณะข้างต้น



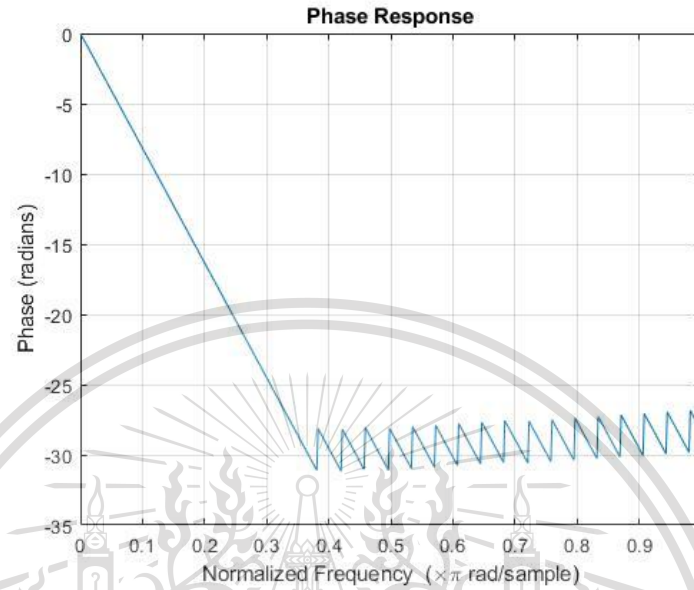
รูปที่ 3.14 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

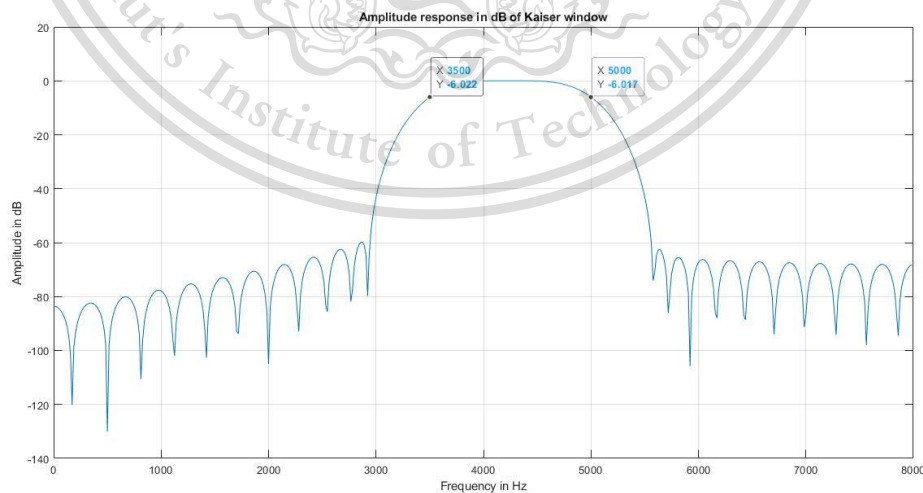
และจะได้ Phase response โดยแกนตั้งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกน  
นอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 Phase response ของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้  
Kaiser window function

3) FIR bandpass filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 3.5 kHz  
และ 5 kHz ซึ่งจาก Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่  
ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.16



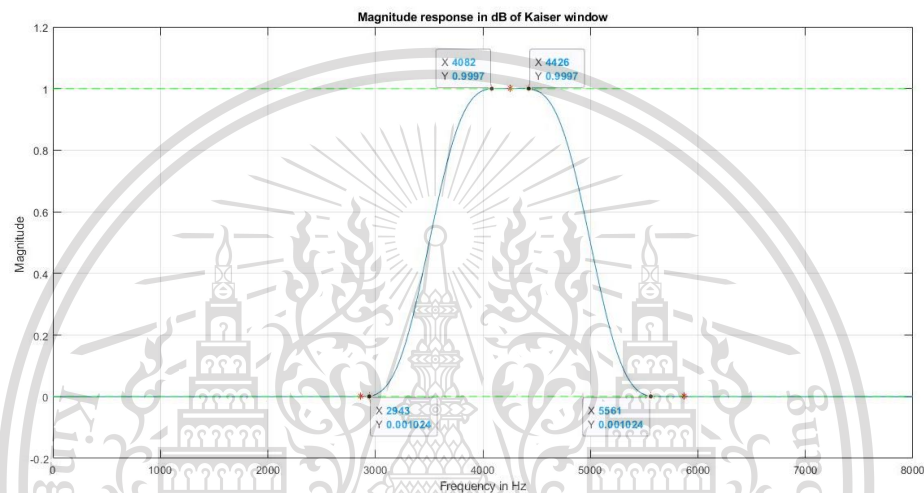
รูปที่ 3.16 Amplitude response ของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้  
Kaiser window function ในหน่วย dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ให้บุคคลอื่น  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณส่วนที่เป็น stopband attenuation มีค่าต่ำกว่า -60 dB ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้อีกหนึ่งคุณลักษณะที่กำหนดไว้ คือ Transition width เท่ากับ 1.1 kHz ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.17 ซึ่ง bandpass filter มี Transition width 2 ช่วง จากรูปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2,943 Hz ถึง 4,082 Hz และ ในช่วงระหว่าง 4,426 Hz ถึง 5,561 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1,139 Hz และ 1,135 Hz ตามลำดับ ใกล้เคียงกับคุณลักษณะข้างต้น



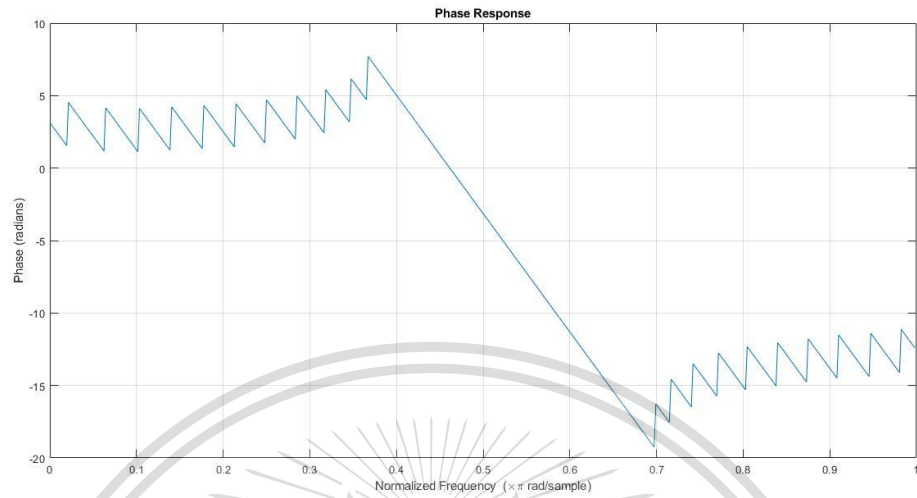
รูปที่ 3.17 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

และจะได้ Phase response โดยแกนตั้งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกน  
นอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

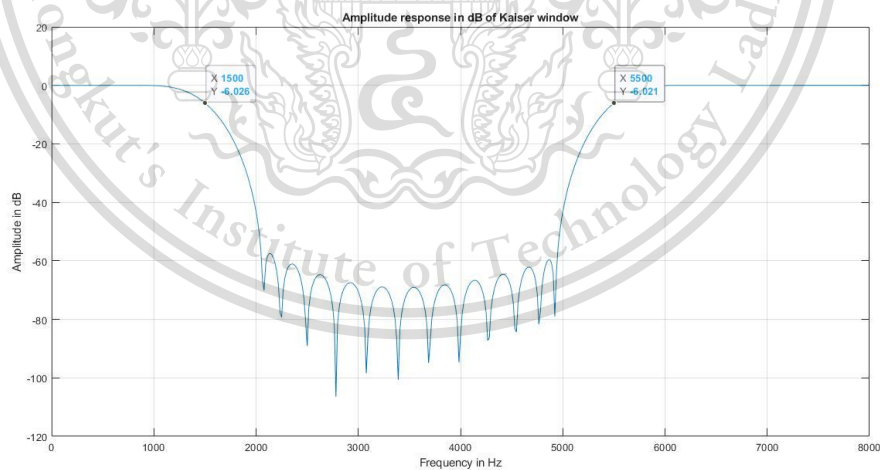
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.18 Phase response ของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

4) FIR bandstop filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 1.5 kHz และ 5.5 kHz ซึ่งจาก Amplitude response ในหน่วย dB แสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่มีความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.19



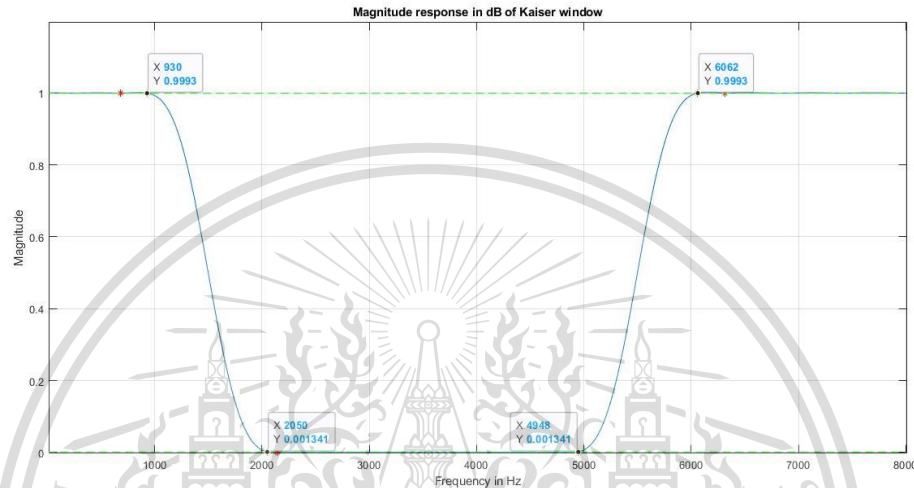
รูปที่ 3.19 Amplitude response ของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้นที่จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากการค้า  
 จะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณส่วนที่เป็น stopband attenuation  
 มีค่าต่ำกว่า -60 dB ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้อีกหนึ่งคุณลักษณะที่กำหนดไว้ คือ  
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

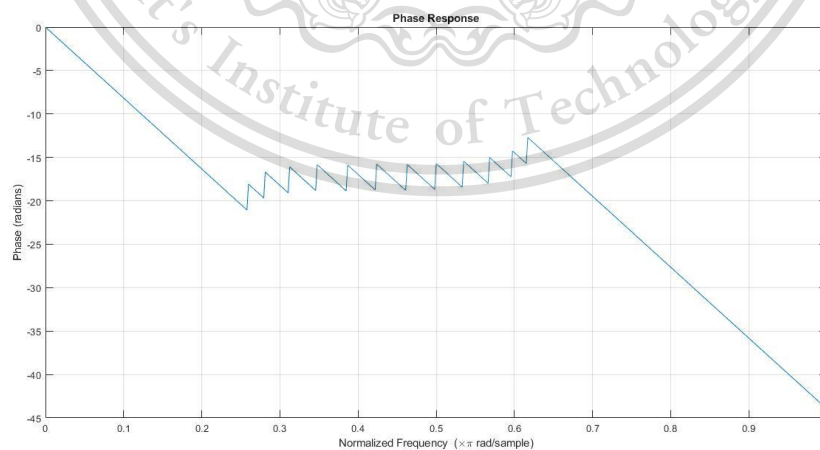
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Transition width เท่ากับ 1.1 kHz ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.20 ซึ่ง bandstop filter มี Transition width 2 ช่วงเช่นเดียวกับ bandpass filter จากรูปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 930 Hz ถึง 2,050 Hz และ ในช่วงระหว่าง 4,948 Hz ถึง 6,062 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1,120 Hz และ 1,114 Hz ตามลำดับ ใกล้เคียงกับคุณลักษณะข้างต้น



รูปที่ 3.20 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

และจะได้ Phase response โดยแกนตั้งจะวัดในหน่วยเรเดียน ส่วนแกนนอนจะทำการ normalized frequency จะได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 Phase response ของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลการออกแบบฟิลเตอร์ด้วย Kaiser window เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก fixed window function ก่อนหน้า จะเห็นได้ว่าฟิลเตอร์ที่ออกแบบด้วย Kaiser window สามารถกำหนดคุณลักษณะจำเพาะของฟิลเตอร์ได้ ทำให้ได้ฟิลเตอร์ตามคุณสมบัติที่ผู้ทำการออกแบบต้องการมากกว่าการใช้ window function

ปริญญาพนธ์นี้จะนำเอาวิธีการออกแบบด้วย Kaiser window นี้ไป implement ใช้งานกับบอร์ด STM32F769I ด้วยโปรแกรม Simulink โดยที่ในโปรแกรม Simulink นี้จะใช้บล็อกสำเร็จในโปรแกรมและการเขียนโค้ดโดยใช้บล็อก MATLAB M-File Function จากนั้นจะทำการวัดผลตอบสนองความถี่ด้วยเครื่อง dynamic analyzer และวัดผลในโดเมนเวลาด้วยเครื่องดิจิตอลออสซิลออสโคป

### 3.1.1.3 การประยุกต์ใช้งาน FIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี windowing

ปริญญาพนธ์นี้ทำการประยุกต์ใช้งานโดยการนำ FIR filter มาสร้างเป็น Graphic Equalizer เป็น Equalizer ที่สามารถทำการปรับเพิ่มหรือลดค่าเกนของสัญญาณได้ เมื่อทำการสร้างจาก FIR filter จะทำให้เฟสของสัญญาณมีความเป็นเชิงเส้น แต่มีข้อจำกัดคือ ตัว Equalizer จะกำหนดค่าความถี่ที่สามารถใช้งานได้มาแล้ว ไม่สามารถเลือกปรับค่าเกนที่ค่าความถี่จำเพาะได้ FIR filter ที่นำมาใช้งานจะใช้ Kaiser window function ในการออกแบบ ซึ่งจากผลการทดสอบการออกแบบ FIR filter โดยใช้ Kaiser window function (จากหัวข้อที่ 3.5 เรื่อง ผลการทดสอบข้อจำกัดการรองรับค่า filter length ที่บอร์ด STM32F769I สามารถรองรับได้) ค่า filter length, N ที่บอร์ด STM32F769I สามารถรองรับและเพื่อทำการประมวลผลได้สูงสุดอยู่ที่ 103 ดังนั้นปริญญาพนธ์นี้จึงทำการกำหนดช่วงความถี่เป็น 3 ช่วง ออกแบบเป็น 3-band Graphic Equalizer ซึ่งการทำงานของ Graphic Equalizer จะเป็นการทำงานพร้อมกันทุก band ทำให้ค่า filter length ที่แต่ละ band สามารถใช้ได้คือ  $N = 33$  โดยมีคุณลักษณะดังนี้

1) ช่วงความถี่ต่ำใช้การออกแบบ Lowpass filter เป็นฟิลเตอร์สำหรับเพิ่มหรือลดค่าเกนในช่วงนี้

โดยกำหนดค่า passband edge frequency (-6 dB) อยู่ที่ 2.67 kHz

sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation (A) 60 dB

2) ช่วงความถี่กลางใช้การออกแบบ Bandpass filter เป็นฟิลเตอร์สำหรับเพิ่มหรือลดค่าเกนในช่วงนี้

โดยกำหนดค่า passband edge frequency (-6 dB)

อยู่ที่ 2.67 kHz และ 5.33 kHz

sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Stopband attenuation (A) 60 dB

3) ช่วงความถี่สูงใช้การออกแบบ Highpass filter เป็นฟิลเตอร์สำหรับเพิ่มหรือลดค่าเกินในช่วงนี้

โดยกำหนดค่า passband edge frequency (-6 dB) อยู่ที่ 5.33 kHz

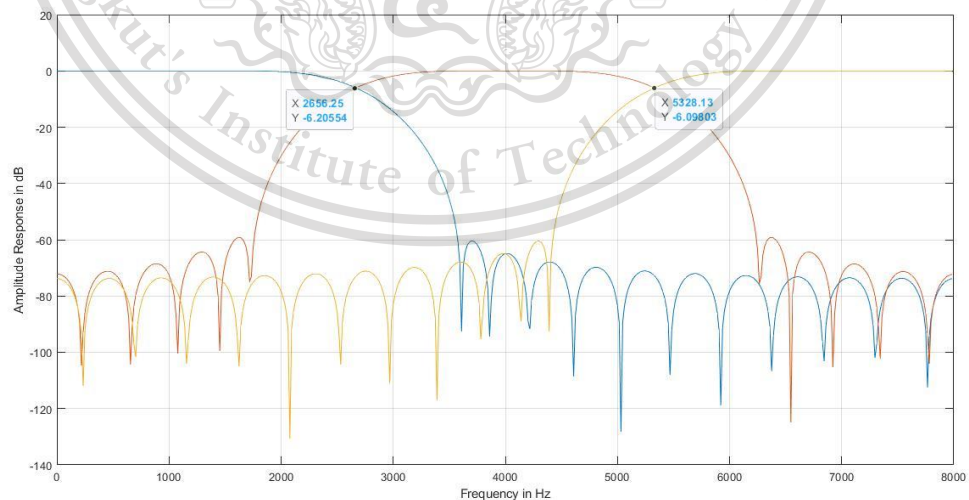
sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation (A) 60 dB

จากคุณลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า  $\beta = 5.6533$  และ เมื่อทำการคำนวณหาค่า Transition width จากสมการที่ 3.8 จะได้ค่า Transition width เท่ากับ 1.75 kHz และจาก amplitude response ของฟิลเตอร์แต่ละแบนด์ที่แสดงดังรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าฟิลเตอร์ทั้ง 3 แบนด์มีคุณลักษณะตรงตามที่กำหนดไว้ทั้งค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่ง passband edge frequency ซึ่งมีค่าเท่ากับ -6 dB และ Stopband attenuation สูงสุดอยู่ที่ -60 dB โดยที่จากรูปที่ 3.22 กราฟทางด้านซ้ายมือคือ Lowpass Filter กราฟตรงกลางคือ Bandpass Filter และกราฟด้านขวามือคือ Highpass Filter

เมื่อทำการพล็อต amplitude response รวมซึ่งจะเป็น amplitude response จริงที่เกิดขึ้นขณะที่แบนด์ทั้ง 3 แบนด์ของ 3-band Graphic Equalizer ทำงานพร้อมกัน จากรูปที่ 3.23 เป็น amplitude response รวมที่ค่าเกินทุกแบนด์มีค่าเท่ากับ 0 dB จะได้ผลการตอบสนองรวมที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง เนื่องจากที่ passband edge frequency เท่ากับ -6 dB ที่ 2.66 kHz และ 5.33 kHz ของฟิลเตอร์ที่อยู่ติดกันจะทำการเสริมกัน ทำให้เกินรวมมีค่าประมาณ 0 dB



รูปที่ 3.22 Amplitude response ของฟิลเตอร์แต่ละแบนด์ใน

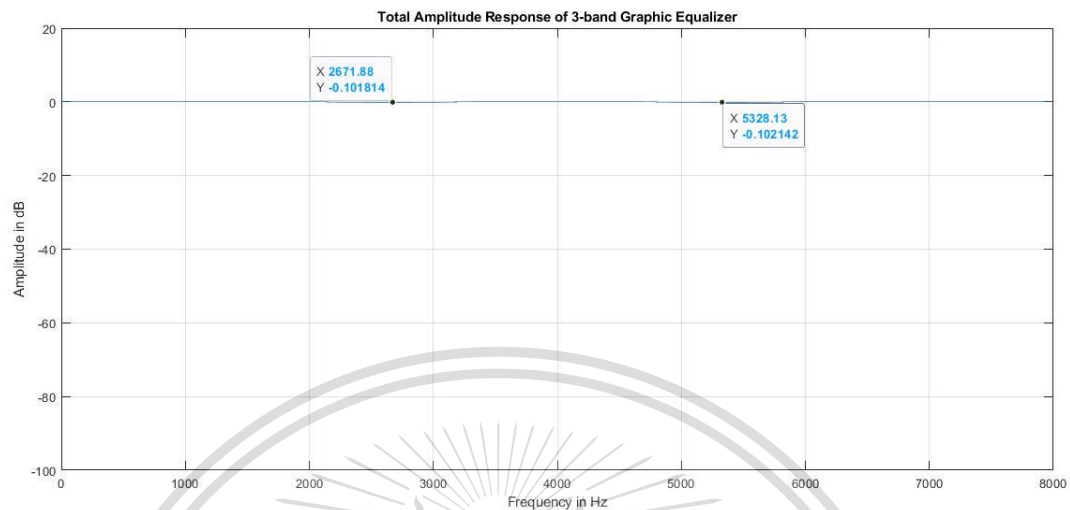
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน โปรดอย่าเผยแพร่ไปโดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3-band Graphic Equalizer ในหน่วย dB

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.23 Amplitude response รวมของ 3-band Graphic Equalizer  
ที่ค่าเกณฑ์ของทุกแบนด์มีค่าเป็น 0 dB

## 3.2 โครงสร้าง

โครงสร้างที่นิยมใช้ในการสร้าง FIR filter มี 2 รูปแบบดังนี้

### 3.2.1 Direct Form

โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.24 โดยองค์ประกอบที่สำคัญของโครงสร้างนี้มี 3 ส่วน คือ

#### 3.2.1.1 Unit delay

ทำหน้าที่ในการเลื่อนเวลา แสดงในกรอบสี่เหลี่ยมหรือกรอบด้านบนสุด บนรูปที่ 3.24 โดยจำนวน Unit delay จะมีค่าเท่ากับค่า filter length ลบด้วย 1 ( $N - 1$ )

#### 3.2.1.2 วงจรคูณ

วงจรคูณหรือเกนเป็นส่วนที่ใช้ในการใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ส่วนนี้ แสดงในกรอบสี่เหลี่ยมหรือกรอบตรงกลางบนรูปที่ 3.24

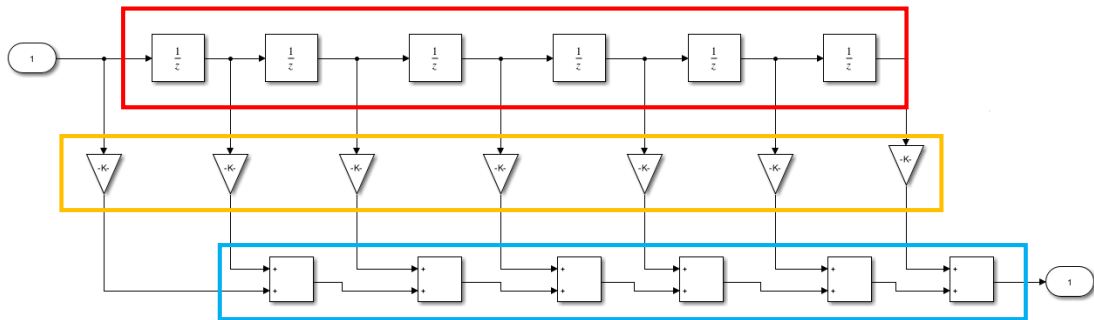
#### 3.2.1.3 วงจรบวก

ทำหน้าที่ในการรวมค่าที่ได้จาก 2 วงจรแรก ซึ่งหากมองในรูปของสมการจะเป็นส่วนที่รวมค่าต่างๆให้เป็น transfer function แสดงในกรอบสี่เหลี่ยมหรือกรอบด้านล่างสุดบนรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

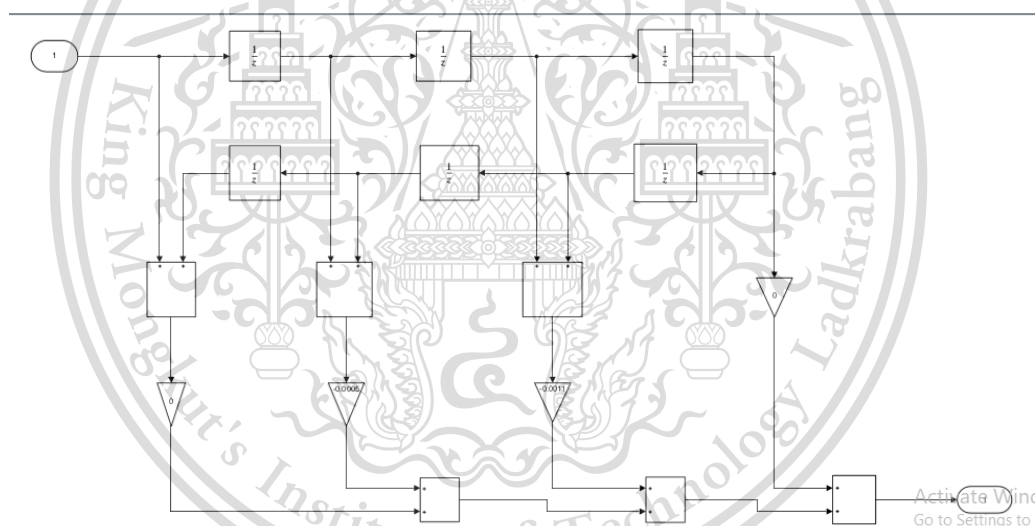
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.24 โครงสร้าง Direct Form ของ 7-tap FIR filter

### 3.2.2 Linear-phase structure

องค์ประกอบต่างๆเหมือนกับโครงสร้างแบบ Direct Form แต่เนื่องจาก FIR filter มีคุณสมบัติเป็น Linear phase ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์สามารถยุบรวมกันได้ ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 โครงสร้าง linear-phase structure ของ 7-tap FIR filter

ข้อดีของการใช้โครงสร้างนี้คือในส่วนของฮาร์ดแวร์สามารถลดการใช้ทรัพยากรในการคำนวณได้ ซึ่งจากรูปที่ 3.17 และ 3.18 มีค่า filter length ที่น้อยอาจไม่เห็นความแตกต่างมากนัก แต่หากค่า filter length มีค่ามากๆ โครงสร้างแบบ Linear-phase structure จะสามารถช่วยให้การใช้ฮาร์ดแวร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3 โปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสร้างและวัดผลการสร้าง FIR filter มีดังนี้

#### 3.3.1 โปรแกรม MATLAB

ใช้สำหรับคำนวณและออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ รวมทั้งทำการพล็อตกราฟ ทำผลการ simulation สำหรับการเปรียบเทียบและตรวจสอบผลการ implement หรือการสร้างฟิลเตอร์

#### 3.3.2 โปรแกรม Simulink

ใช้สำหรับสร้างโครงสร้างสำหรับการสร้างฟิลเตอร์ แล้วทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I เพื่อวัดผลการสร้างฟิลเตอร์หรือนำไปใช้งานต่อไป

#### 3.3.3 บอร์ด STM32F769I

ใช้สำหรับ implement หรือ สร้างฟิลเตอร์และวงจรต่างๆ จากโปรแกรม Simulink โดยเมื่อทำการ build เครื่องมือต่างๆ จากโปรแกรม Simulink แล้วจะทำการต่อสายสัญญาณ ระหว่างบอร์ดกับเครื่อง Dynamic Signal Analyzer หรือ Oscilloscope เพื่อวัดค่าต่างๆต่อไป

#### 3.3.3 Dynamic Signal Analyzer

วัดผลการสร้างฟิลเตอร์ โดยจะใช้ในการตรวจสอบว่า Frequency Response ที่ได้จากการสร้างฟิลเตอร์โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบ ตรงกับ Frequency Response ที่ทำการ simulation ไว้หรือไม่

#### 3.3.4 Digital Oscilloscope

ใช้วัดสัญญาณใน time domain เพื่อตรวจสอบว่าฟิลเตอร์ที่สร้างนั้นมีคุณลักษณะ ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่

### 3.4 การจัดเก็บผลการทดลอง

การออกแบบ digital filter จะสำเร็จเมื่อได้รับค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ออกมา โดยการ จัดเก็บผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

#### 3.4.1 วัดผลใน frequency domain

จะทำการ simulation หรือพล็อต Frequency Response ของฟิลเตอร์ด้วย โปรแกรม MATLAB ไว้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ Frequency Response ของฟิลเตอร์ที่ได้มาจากการวัดโดยใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer

#### 3.4.2 วัดผลใน time domain

ใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ทำการสร้างสัญญาณความถี่ต่างๆ เพื่อ ตรวจสอบว่าที่ความถี่ที่ทำการตรวจสอบ ฟิลเตอร์สามารถทำงานได้ตรงตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

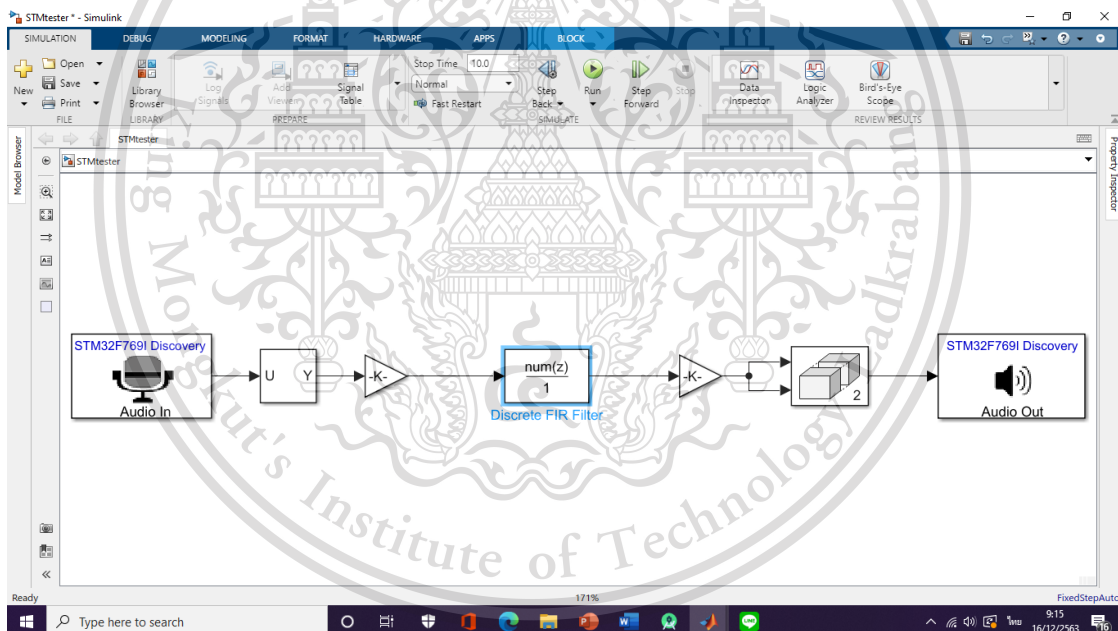
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยการเก็บและวัดผลทั้ง 2 ส่วนหากผลลัพธ์ที่ได้ตรงตามผลการ simulation หรือคุณลักษณะของฟิลเตอร์ จะถือว่าการออกแบบและสร้างฟิลเตอร์นั้นๆ สำเร็จสามารถนำไปใช้งานต่อได้ แต่หากผลลัพธ์ที่ได้ไม่ตรงตามผลการ simulation หรือคุณลักษณะของฟิลเตอร์ก็จะต้องนำมาตรวจสอบใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเพื่อหาสาเหตุของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นและทำการแก้ไขให้บรรลุคุณลักษณะที่กำหนดไว้

### 3.5 ผลการทดสอบข้อจำกัดการรองรับค่า filter length ที่บอร์ด STM32F769I สามารถรองรับได้

เมื่อทำการทดลอง build FIR lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.26 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้



รูปที่ 3.26 โครงสร้าง Simulink block ที่ใช้ในการสร้าง FIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I

ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ปริณูณานิพนธ์นี้ใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

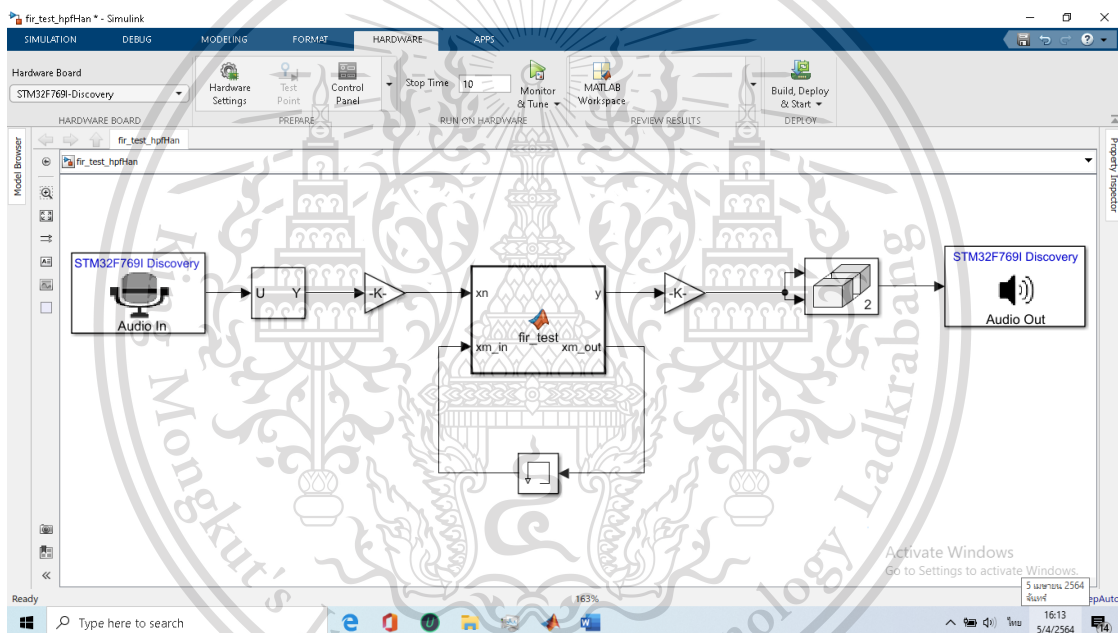
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปแบบเดียว เนื่องจากผล Frequency Response ที่ได้เหมือนกันทั้ง 2 รูปแบบ และข้อจำกัดของบอร์ด STM32F769I

### 3.6 ผลการทดสอบการสร้าง FIR filter ด้วยวิธี Window Method โดยใช้ Kaiser window function

นำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบมาทำการ implement ลงบอร์ด STM32F769I ซึ่งปริญญาณิพนธ์นี้ได้ทดลองทำการ implement FIR filter ทั้ง 4 รูปแบบ โดยการต่อบล็อก Simulink ดังรูปที่ 3.26 และต่อบล็อก Simulink ด้วย MATLAB function ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 โครงสร้าง MATLAB M-File Function block ที่ใช้ในการสร้าง FIR filter เพื่อทำการ build ลงบอร์ด STM32F769I

#### 3.6.1 วัดผลการสร้าง FIR filter ใน frequency domain

ใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัด Frequency Response ของฟิลเตอร์ รูปแบบต่างๆ ได้ผลดังนี้

##### 3.6.1.1 บล็อก Discrete FIR Filter ในโปรแกรม Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

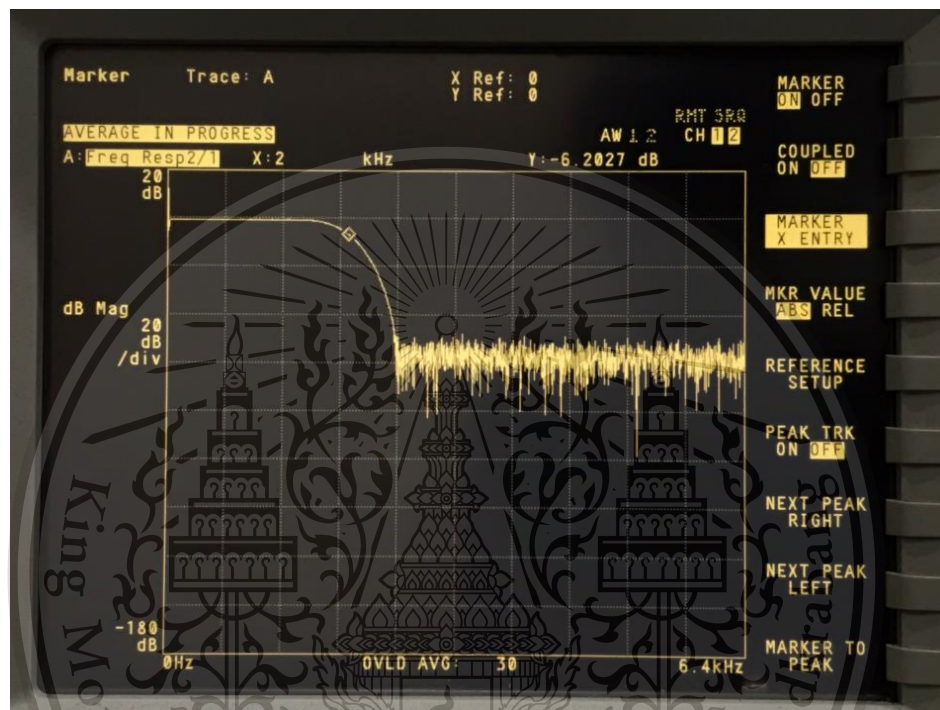
##### 1) ผลการสร้าง FIR Lowpass filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 2 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.2027 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 3.17 %



รูปที่ 3.28 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Lowpass filter ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

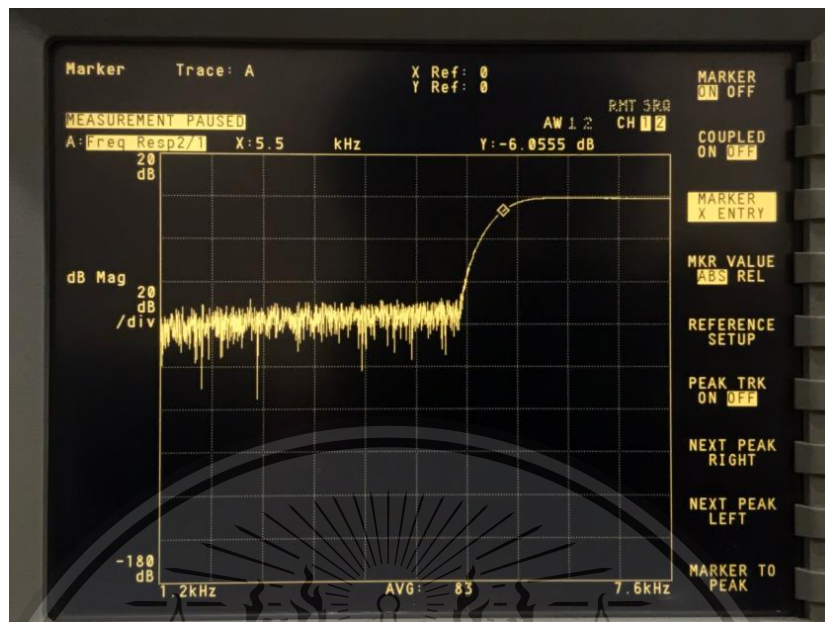
## 2) ผลการสร้าง FIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.29 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.0555 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.29 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Highpass filter  
ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

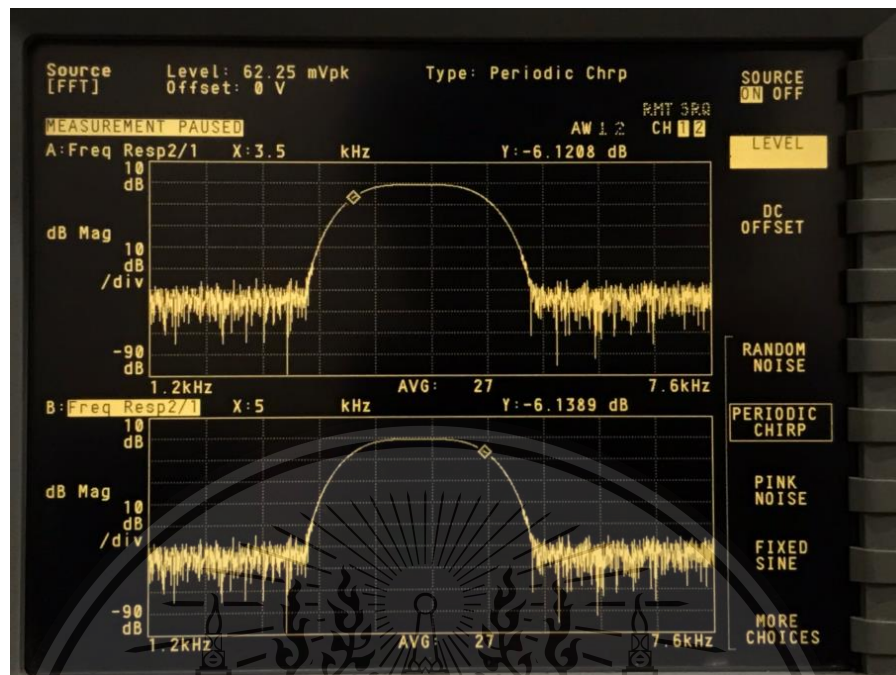
### 3) ผลการสร้าง FIR Bandpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.30 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1208 dB และ -6.1389 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.30 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandpass filter ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

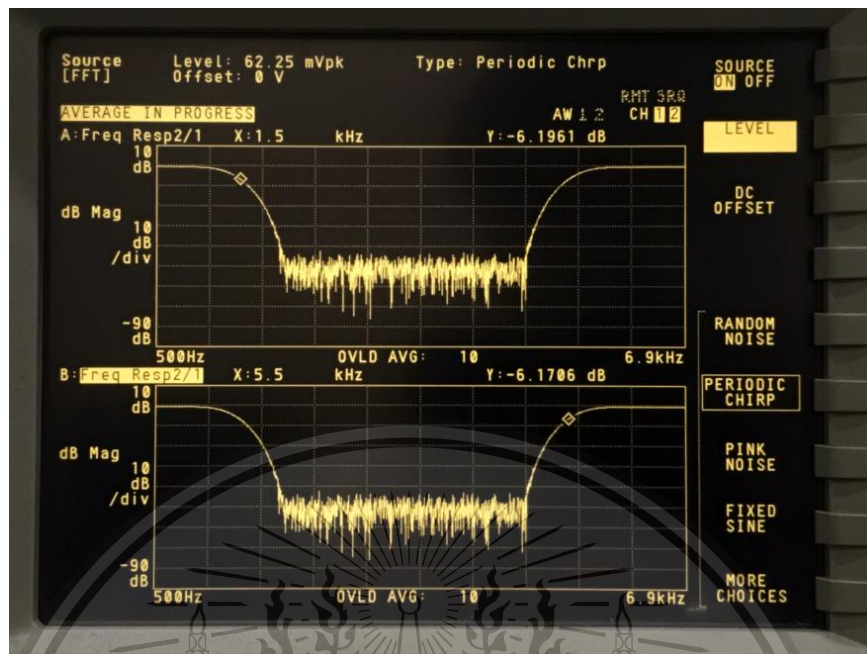
#### 4) ผลการสร้าง FIR Bandstop filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1961 dB และ -6.1706 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.31 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandstop filter  
ด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

### 3.6.1.2 บล็อก MATLAB M-File Function ในโปรแกรม Simulink

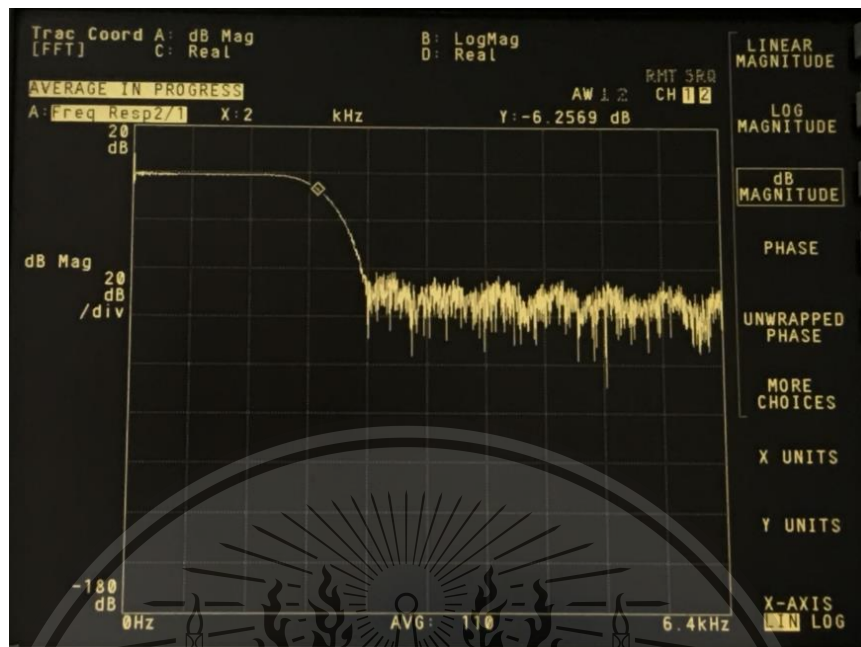
#### 1) ผลการสร้าง FIR Lowpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.32 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 2 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.2569 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.32 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Lowpass filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

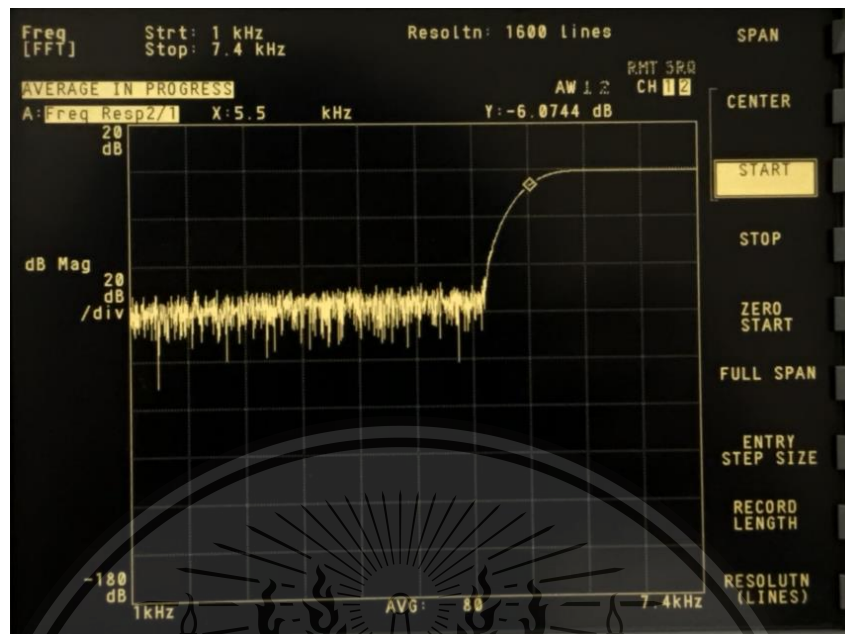
## 2) ผลการสร้าง FIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.33 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.0744 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.33 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Highpass filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

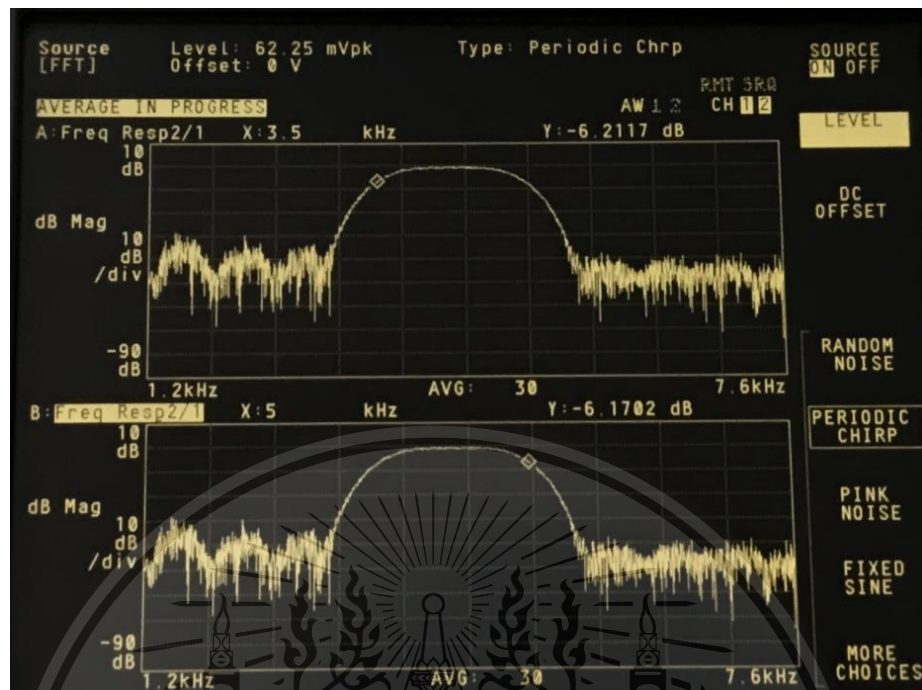
### 3) ผลการสร้าง FIR Bandpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.2117 dB และ -6.1702 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.34 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandpass filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

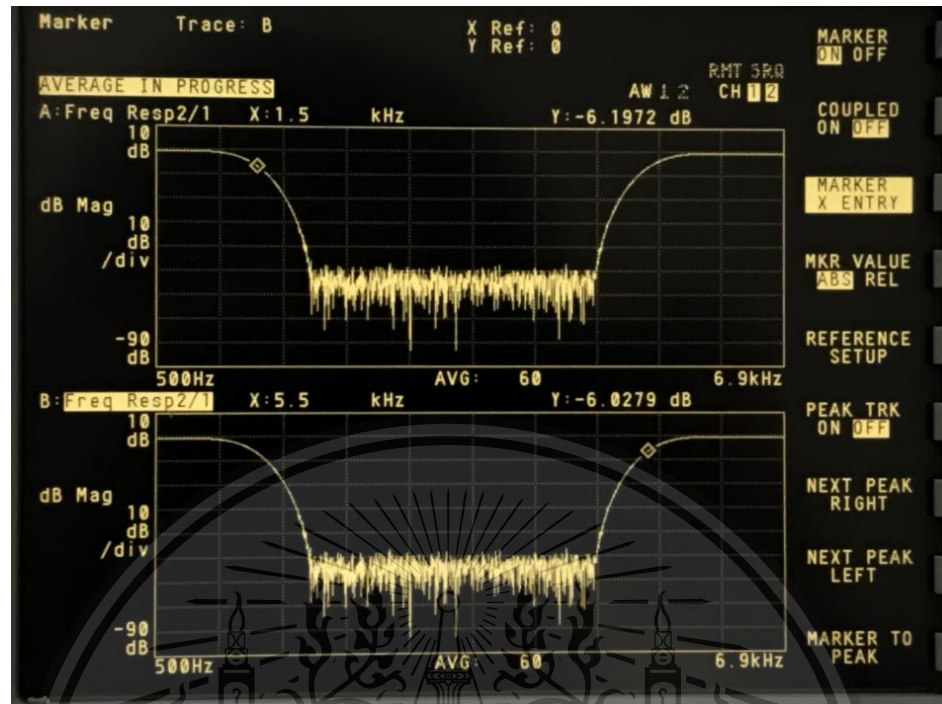
#### 4) ผลการสร้าง FIR Bandstop filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.35 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1972 dB และ -6.0279 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.35 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandstop filter ด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

### 3.6.2 วัดผลการสร้าง FIR filter ใน time domain

ใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดค่าสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับค่าสัญญาณอินพุต โดยการป้อนสัญญาณขาเข้าที่คงค่าแอมพลิจูด ปรับค่าความถี่ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ เพื่อตรวจสอบว่าที่ความถี่นั้นๆฟิลเตอร์สามารถทำงานได้ตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่

#### 3.6.2.1 บล็อก Discrete FIR Filter ในโปรแกรม Simulink

##### 1) ผลการสร้าง FIR Lowpass filter

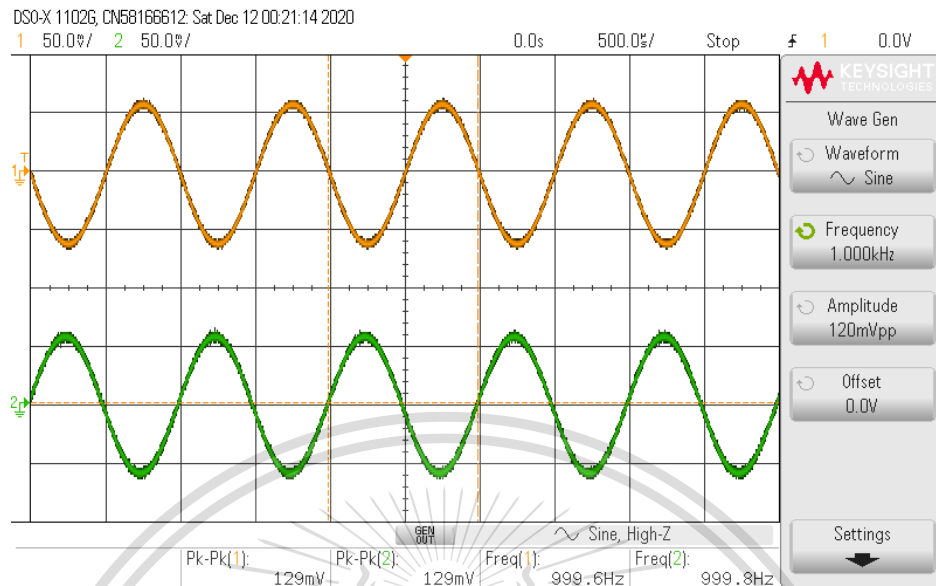
จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.36 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

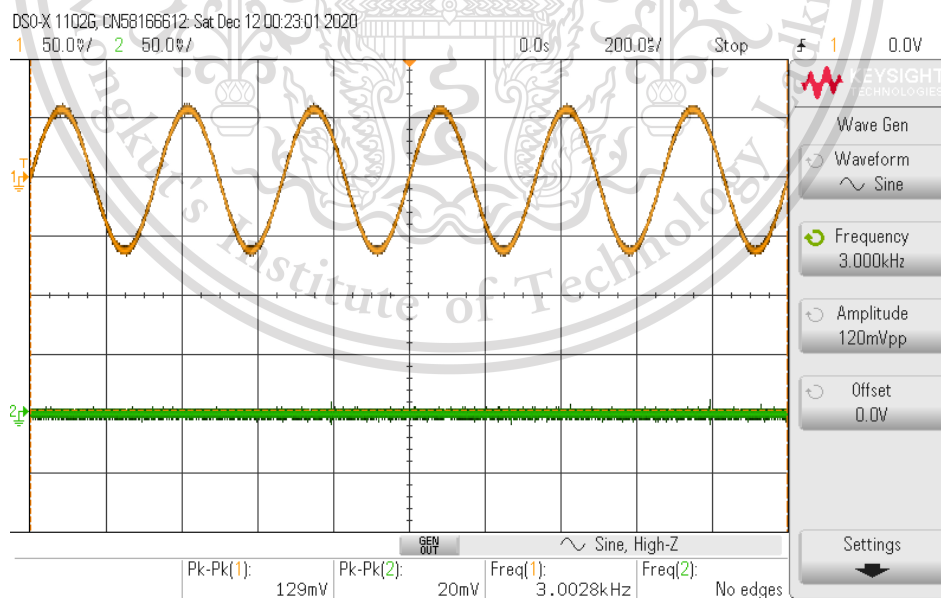
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.36 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Lowpass filter

1.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.37 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.37 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 3 kHz ของ FIR Lowpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

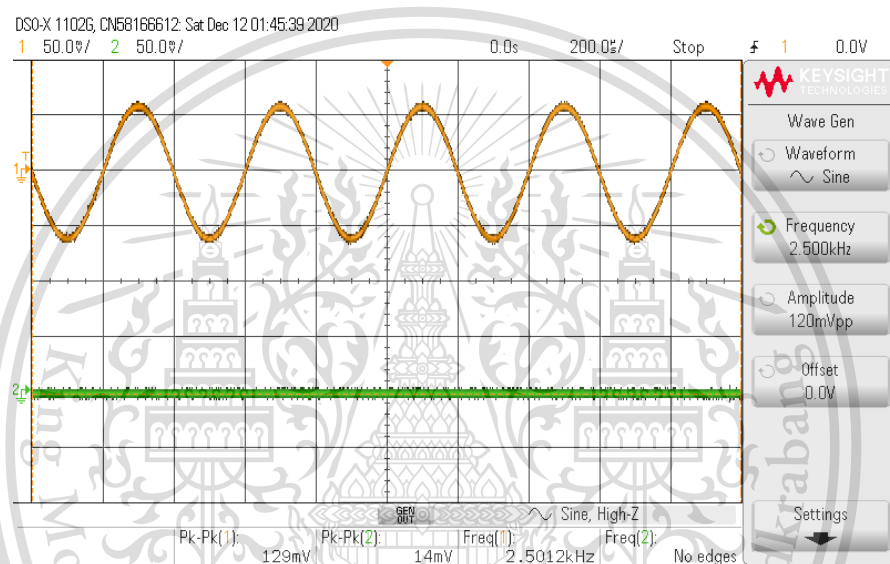
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) ผลการสร้าง FIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.38 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



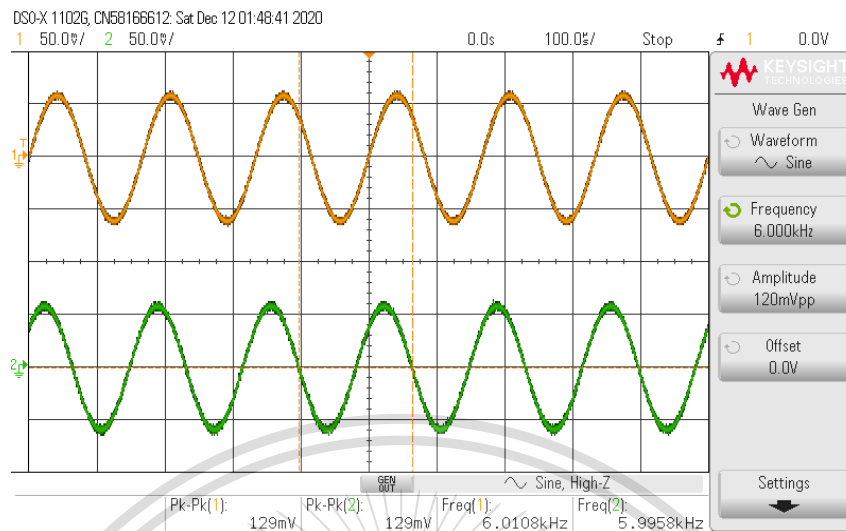
รูปที่ 3.38 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Highpass filter

2.2) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.39 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

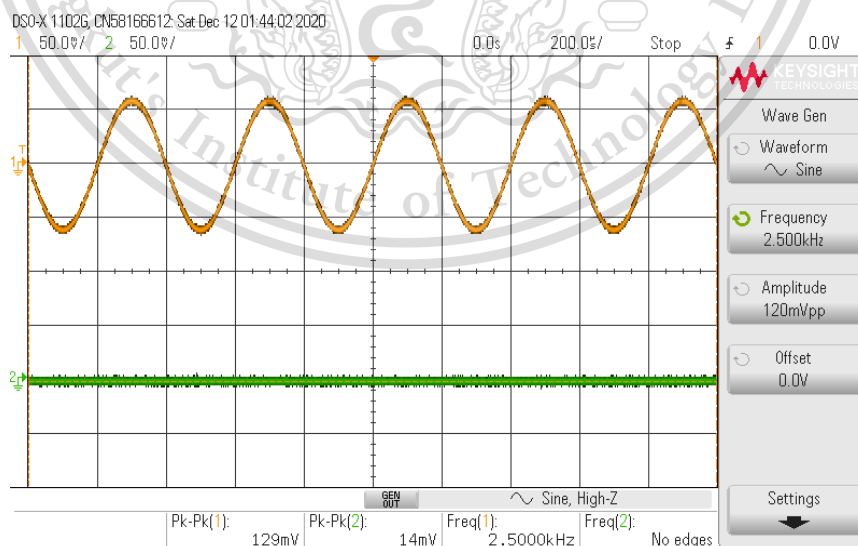


รูปที่ 3.39 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Highpass filter

### 3) ผลการสร้าง FIR Bandpass filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

3.1) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.40 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



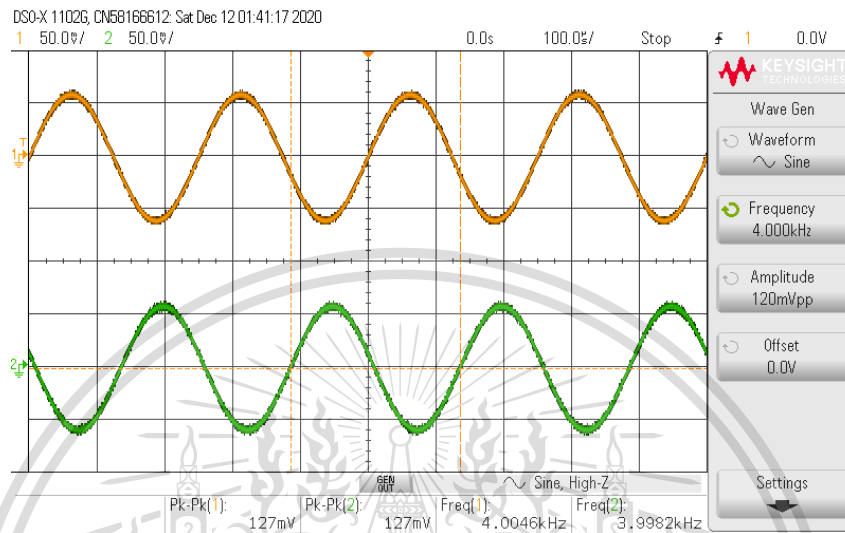
รูปที่ 3.40 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

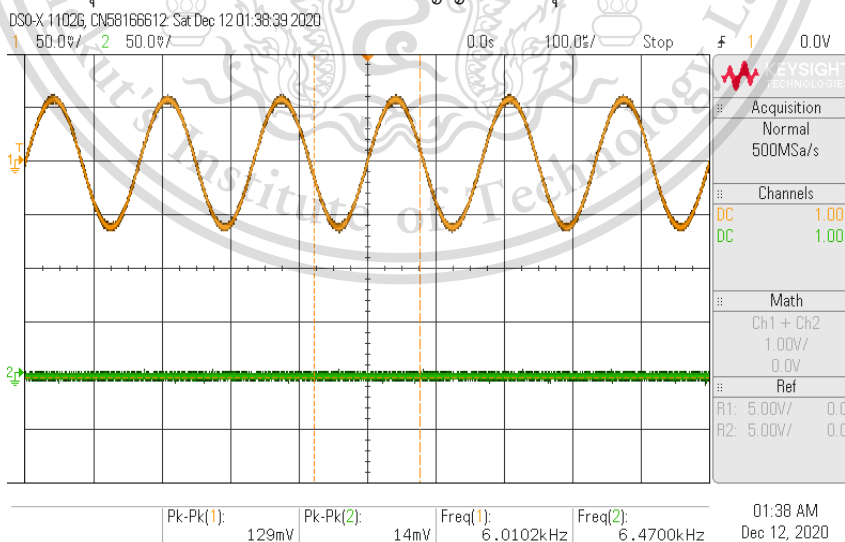
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 4 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.41 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.41 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 4 kHz ของ FIR Bandpass filter

3.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.42 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.42 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 6 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษามาก่อน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ของ FIR Bandpass filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

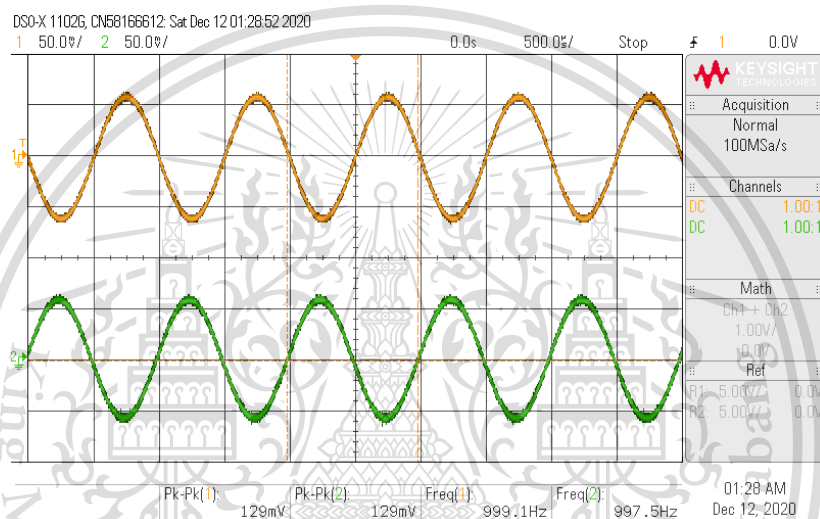
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4) ผลการสร้าง FIR Bandstop filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

4.1) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.43 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



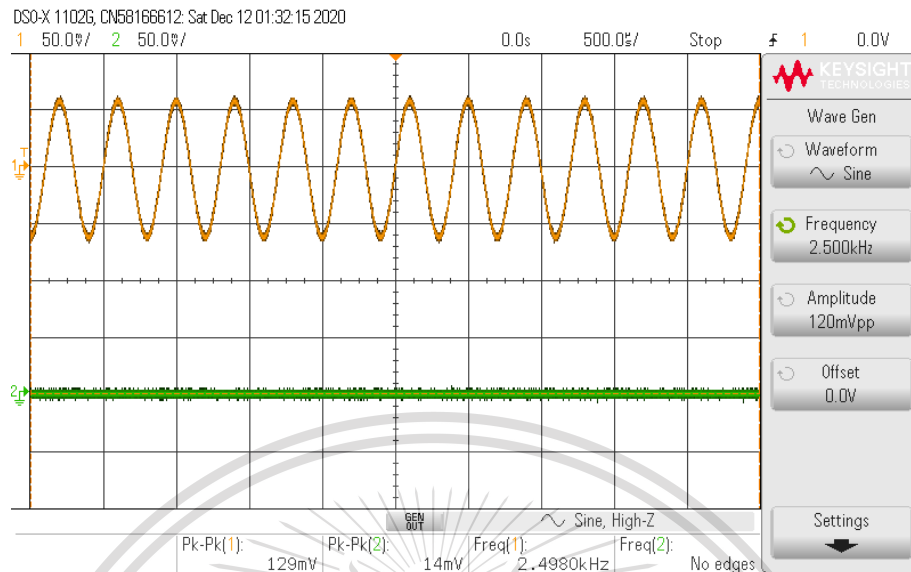
รูปที่ 3.43 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 1 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.2) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.44 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

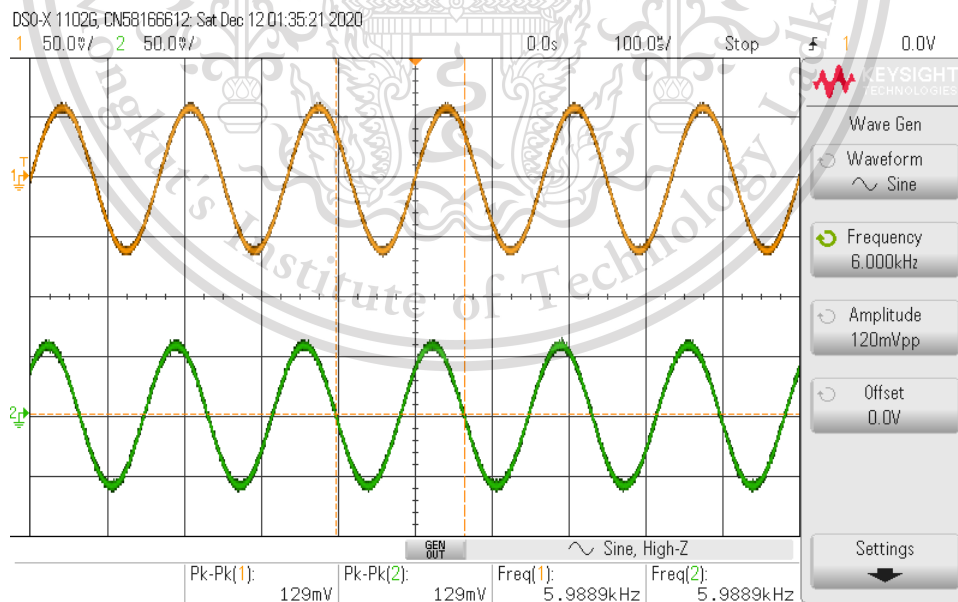
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.44 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.3) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.45 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.45 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น มิใช่เอกสารที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

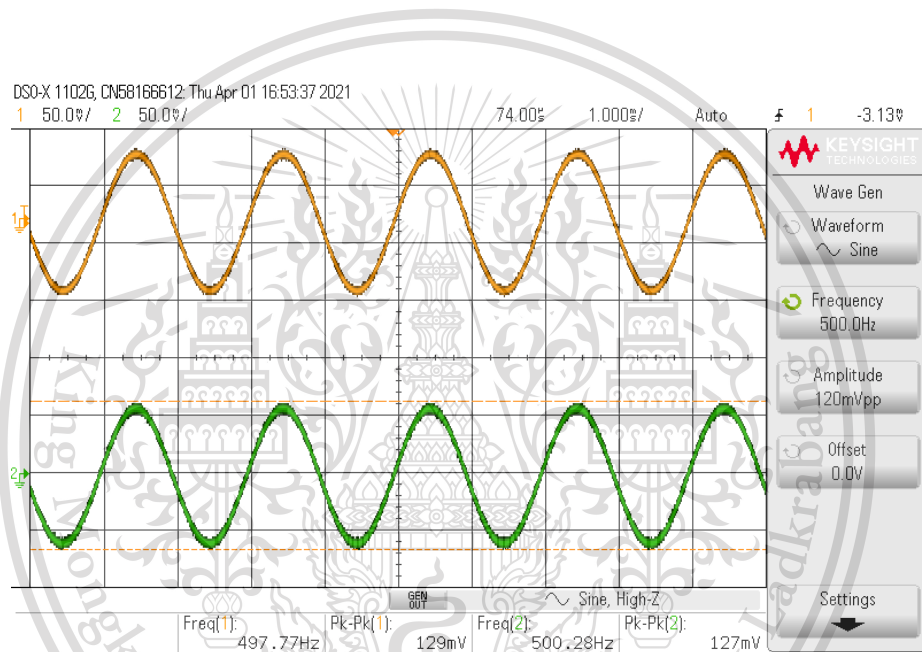
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.6.2.2 ปล็อก MATLAB M-File Function ในโปรแกรม Simulink

#### 1) ผลการสร้าง FIR Lowpass filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 500 Hz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.46 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



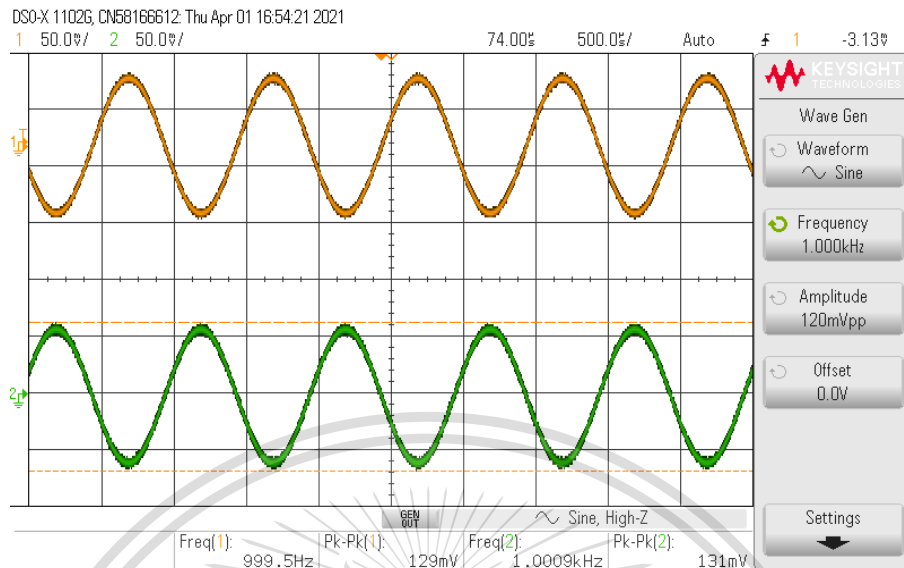
รูปที่ 3.46 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 500 Hz ของ FIR Lowpass filter

1.2) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.47 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

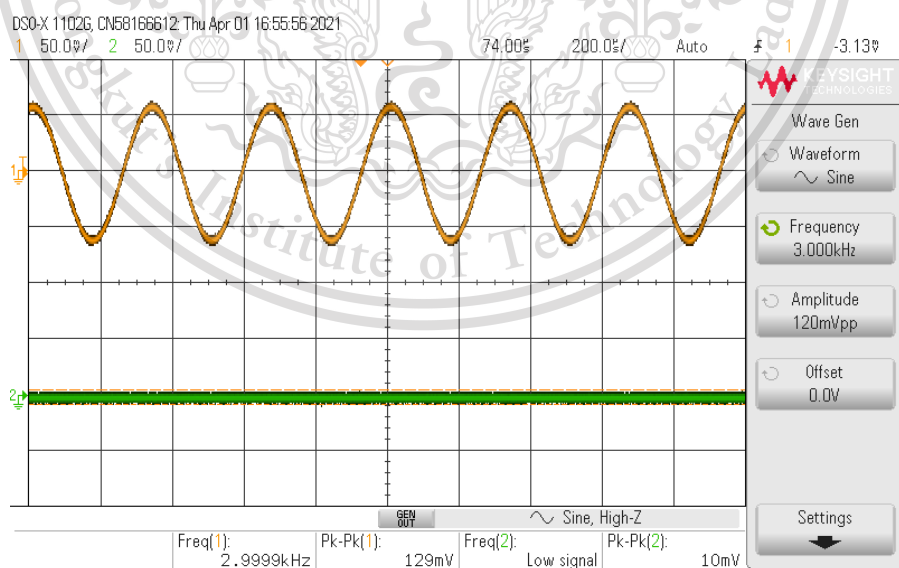
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.47 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์  
 ที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Lowpass filter

1.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.48 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่า  
 แอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.48 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับที่ความถี่ 3 kHz ของ FIR Lowpass filter  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

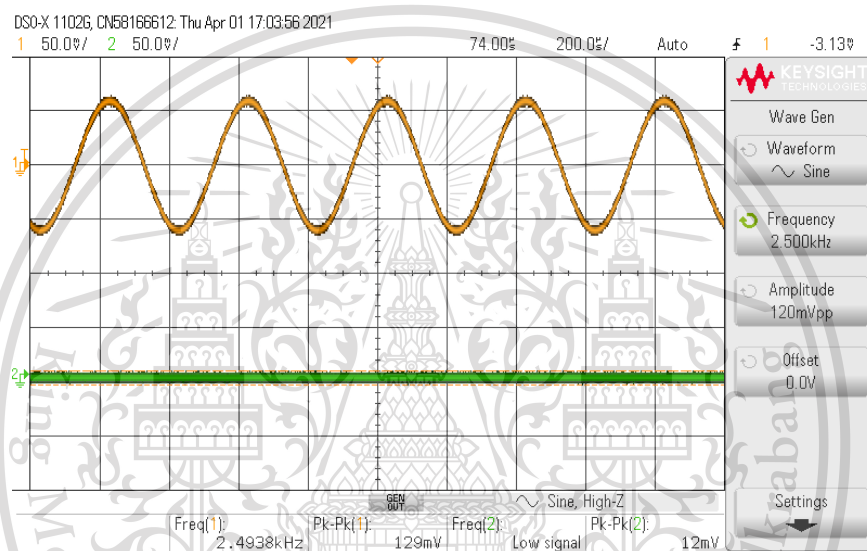
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) ผลการสร้าง FIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.49 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



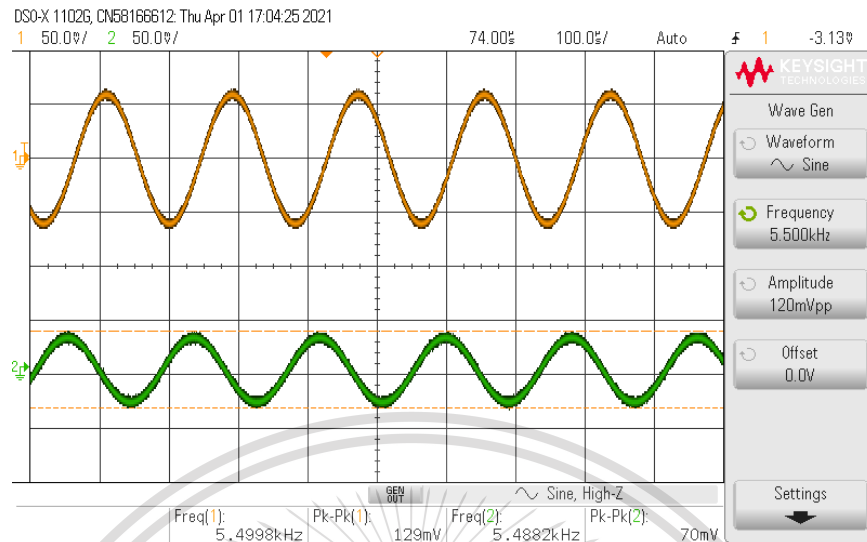
รูปที่ 3.49 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณชายน้ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Highpass filter

2.2) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 5.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.50 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5.5 kHz เป็น passband edge frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

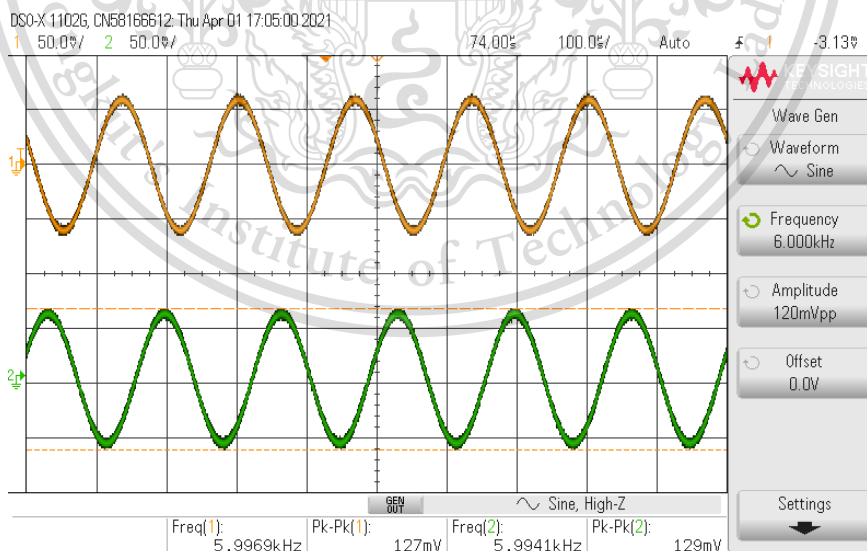
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.50 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 5.5 kHz ของ FIR Highpass filter

2.3) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.51 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



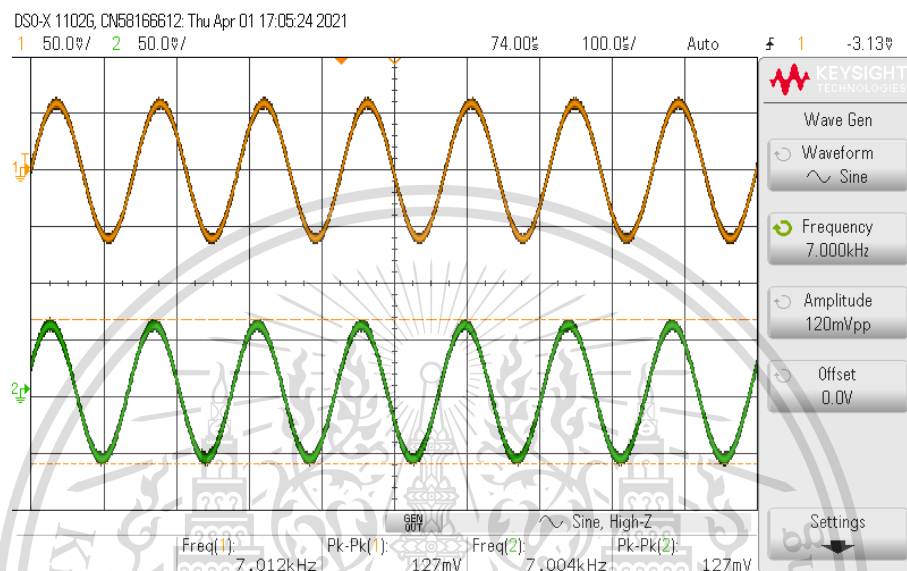
รูปที่ 3.51 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 6 kHz ของ FIR Highpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.52 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.52 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 7 kHz ของ FIR Highpass filter

### 3) ผลการสร้าง FIR Bandpass filter

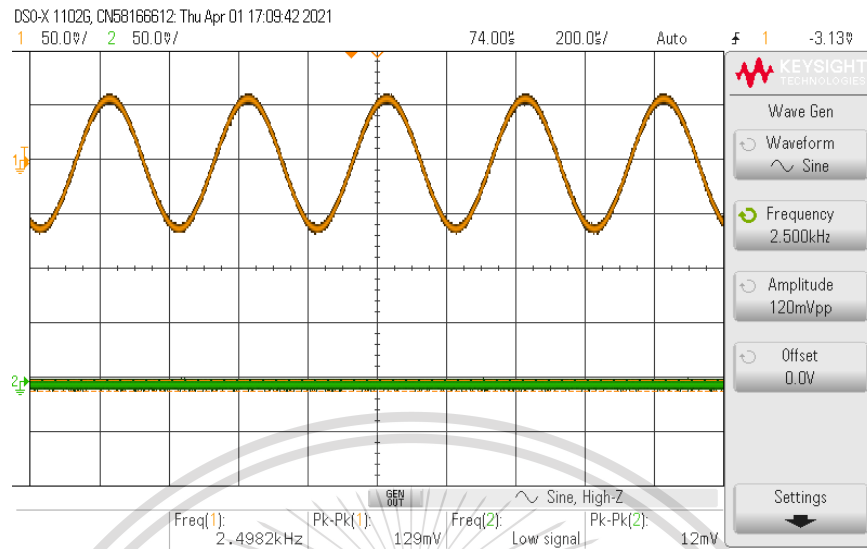
จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

3.1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.53 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

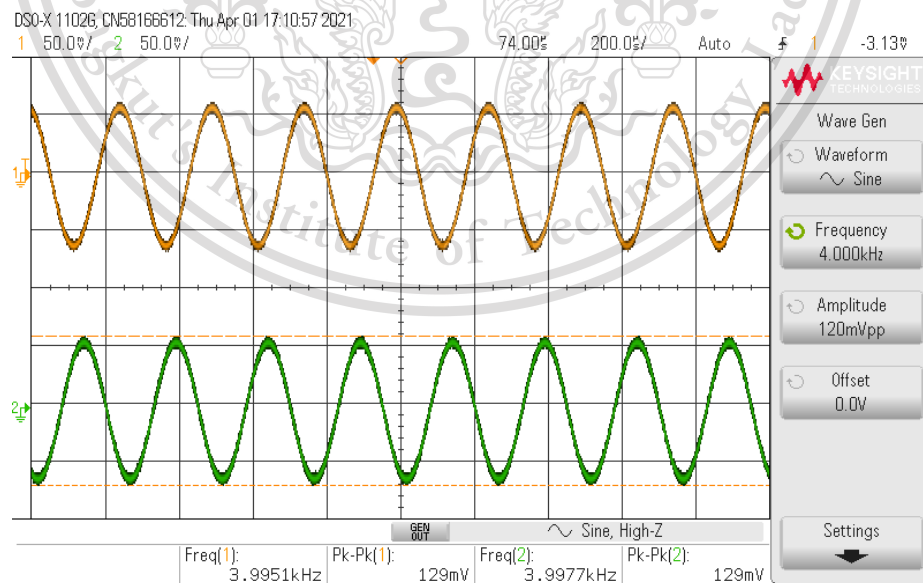
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.53 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandpass filter

3.2) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 4 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.54 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



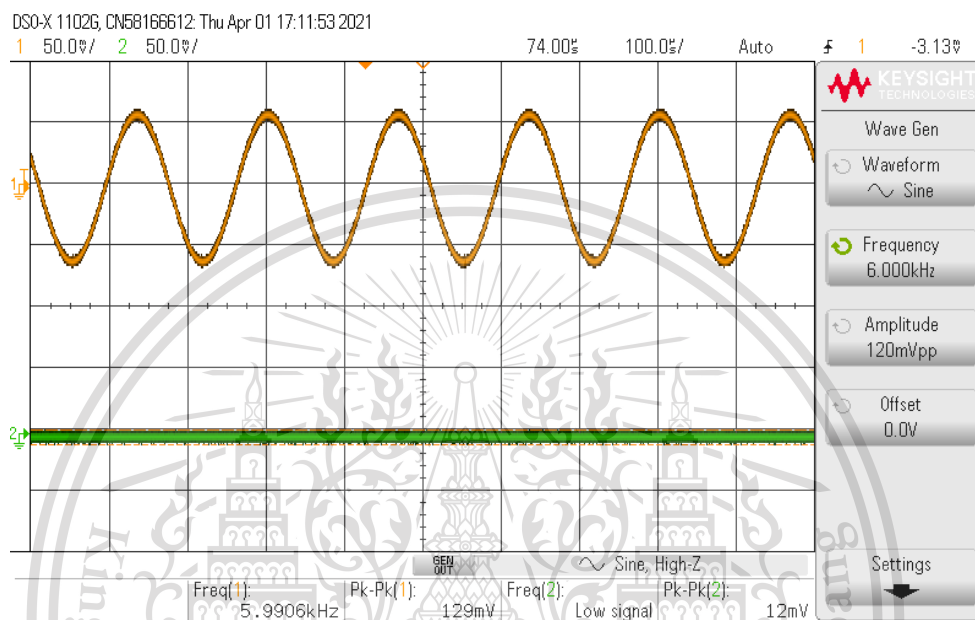
รูปที่ 3.54 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 4 kHz ของ FIR Bandpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านเทคโนโลยีเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.55 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.55 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandpass filter

#### 4) ผลการสร้าง FIR Bandstop filter

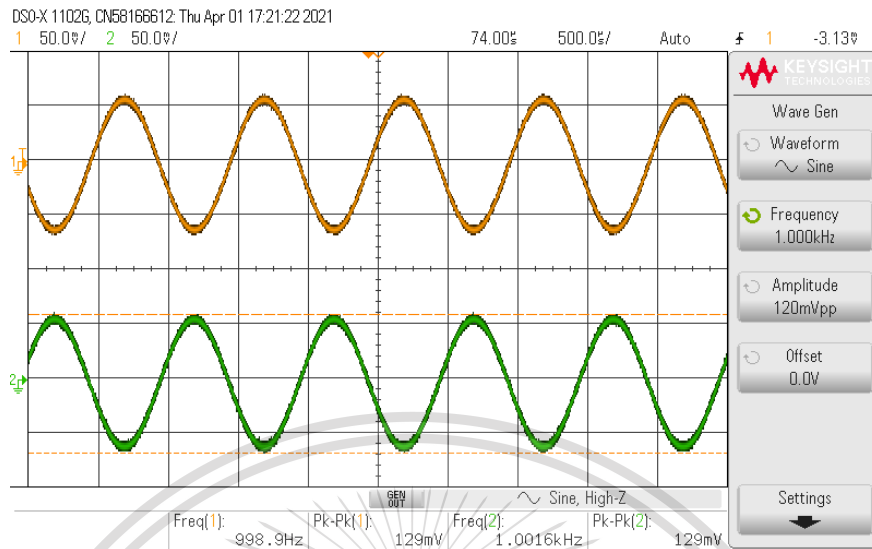
จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

4.1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.56 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

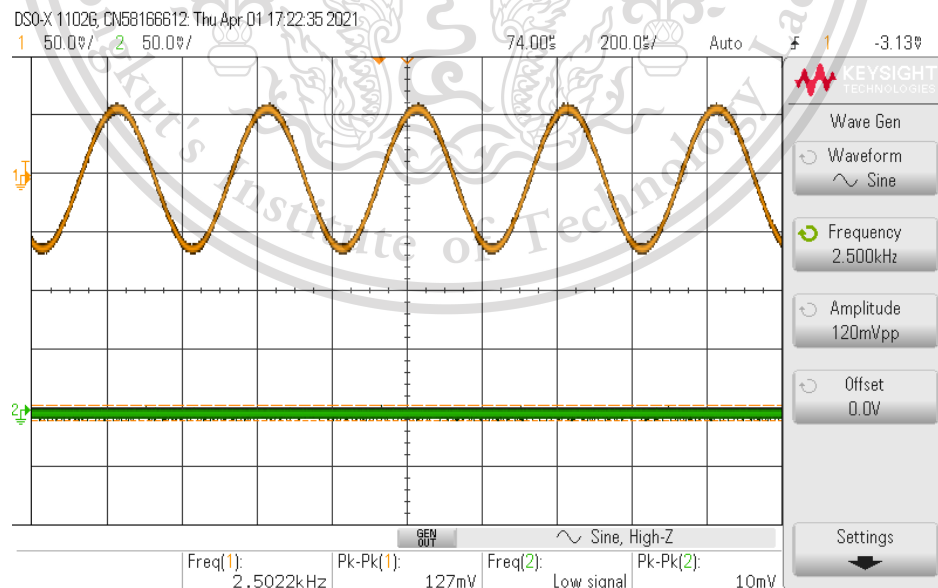
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.56 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 1 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.2) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.57 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



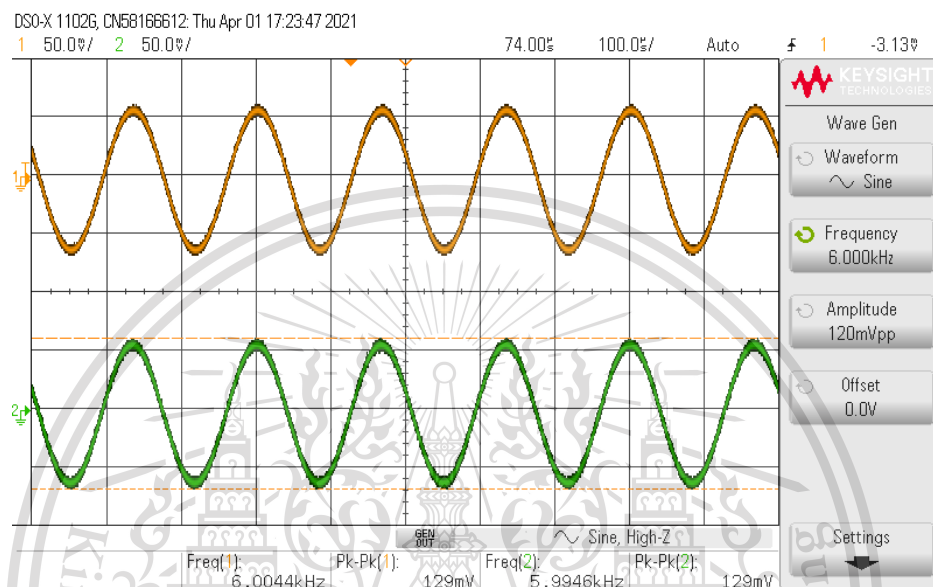
รูปที่ 3.57 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.58 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณ  
อินพุต



รูปที่ 3.58 วัตสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 6 kHz  
ของ FIR Bandstop filter

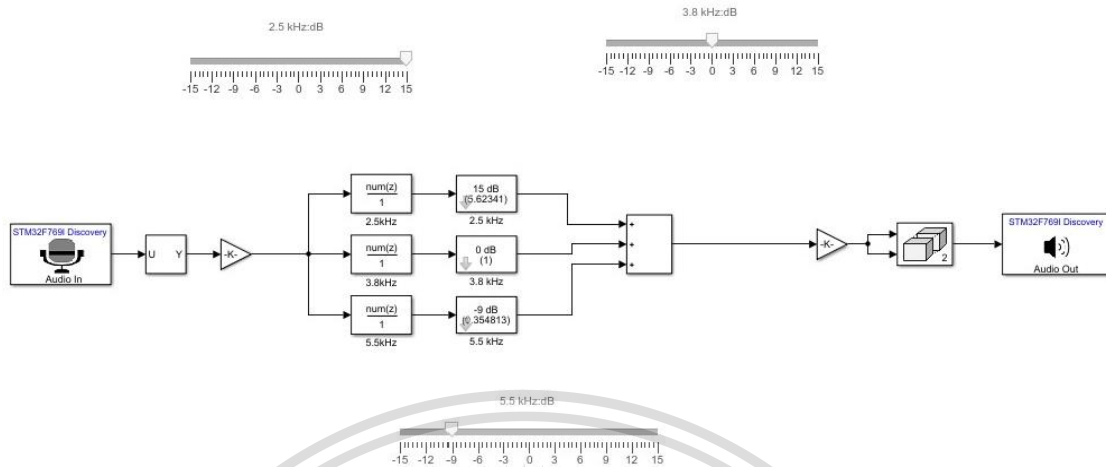
### 3.7 ผลการทดสอบการสร้าง Graphic Equalizer

ทำการ implement บล็อกการทำงานของ Real Time 3-band Graphic Equalizer  
จาก Simulink ลงในบอร์ด STM32F769I โดยโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 3.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

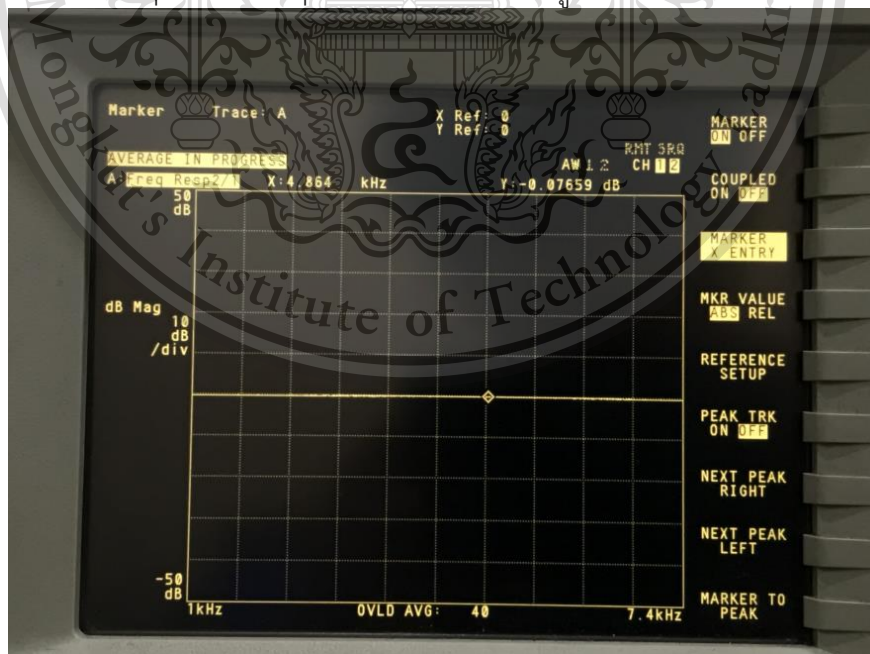
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.59 โครงสร้าง Simulink block ที่ใช้ในการสร้าง 3-band Graphic Equalizer เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I แล้วทำการปรับค่าแบบ Real Time

ทดลองวัดผลการสร้าง Real Time 3-band Graphic Equalizer ใน frequency domain โดยใช้ Dynamic Signal Analyzer วัด Total Amplitude Response 2 คุณลักษณะจะได้อผลดังนี้

- 1) ทดลองวัด Total Amplitude Response โดยการปรับให้ค่าเกณฑ์ทั้ง 3 แบนด์เท่ากับ 0 dB จะได้ Amplitude Response เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.60



รูปที่ 3.60 ผลการวัด total amplitude response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรี โดยให้ค่าเกณฑ์ทุกแบนด์เท่ากับ 0 dB อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทดลองวัด Total Amplitude Response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยการปรับค่าเกณฑ์ดังนี้

ค่าเกณฑ์ของ Lowpass filter: -15 dB

ค่าเกณฑ์ของ Bandpass filter: 12 dB

ค่าเกณฑ์ของ Highpass filter: 0 dB

ซึ่งจะได้ Amplitude Response ดังรูปที่ 3.61 ซึ่งได้ค่า amplitude ตรงตามที่ปรับค่าไว้



รูปที่ 3.61 ผลการวัด total amplitude response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยให้ค่าเกณฑ์ของ Lowpass filter -15 dB, ค่าเกณฑ์ของ Bandpass filter 12 dB และค่าเกณฑ์ของ Highpass filter 0 dB

Real Time 3-band Graphic Equalizer สามารถทำการปรับค่าเกณฑ์ต่างๆ เพื่อดู Frequency Response แบบ Real Time ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบไม่จำกัด

#### 4.1 การออกแบบ

หลักการออกแบบ IIR filter คือ การแปลงตัวแปร  $s$ - $z$  ซึ่งสมการที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(s)$  ด้วยการออกแบบ IIR filter ด้วยการแปลงตัวแปร  $s$  ไปเป็นตัวแปร  $z$  แล้วจะทำให้  $H(s)$  ถูกแปลงเป็น  $H(z)$  โดยวิธีการแปลงตัวแปรที่เป็นที่นิยม เช่น Impulse invariant method และ bilinear transformation การทำให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของดิจิตอลฟิลเตอร์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของ IIR Filter นั้นจะเป็นเศษส่วน โดยสัมประสิทธิ์เศษนั้น คือ ค่า num (Numerator) และสัมประสิทธิ์ส่วนนั้น คือ ค่า den (Denominator) ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะ (specifications) ของดิจิตอลฟิลเตอร์ ซึ่ง IIR filter คือดิจิตอลฟิลเตอร์ชนิดหนึ่ง วิธีการออกแบบ IIR filter แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

##### 4.1.1 การออกแบบด้วยวิธี Poles-zeros placement

การเขียนแสดงการทำงานของ IIR digital filter ด้วย difference equation นั้นสามารถเขียนออกมาในรูปแบบของ recursive equation ดังสมการที่ 4.1

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) - \sum_{k=0}^M b_k y(n-k) \quad (4.1)$$

โดยจากสมการที่ 4.1  $h(k)$  คือ impulse response ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องมีถึง infinite ตัว ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ ทำให้การทำงานของ IIR filter และมีรูปแบบการคำนวณที่เป็นสมการแบบ recursive คือมีการป้อนกลับ

อีกลักษณะหนึ่งที่ใช้เขียนแทน IIR filter คือการแทนให้อยู่ในรูปของ Transfer function  $H(z)$  ดังสมการที่ 4.2

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}}{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}} = \frac{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=0}^M b_k z^{-k}} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยที่  $r = 1 - \left(\frac{BW}{Fs}\right)\pi$  Transfer function ในสมการที่ 4.2 แสดงอยู่ในรูปของเทอมที่ Numerator polynomial ซึ่งรากสมการ Numerator polynomial เป็นศูนย์และทำให้  $H(z)$  มีค่าเป็นศูนย์ด้วยเรียกว่า zeros และรากที่ทำให้ denominator polynomial มีค่าเป็น infinite เรียกว่า poles ดังนั้น สามารถเขียนเป็น transfer function  $H(z)$  ในอีกรูปแบบที่เรียกว่า pole-zero gain ดังสมการที่ 4.3

$$H(z) = \frac{K(z-z_1)(z-z_2)\dots(z-z_N)}{(z-p_1)(z-p_2)\dots(z-p_M)} \quad (4.3)$$

โดย  $z$  เรียกว่า zeros ของ  $H(z)$ ,  $p$  เรียกว่า poles ของ  $H(z)$  และค่า  $K$  เป็นค่าคงที่ที่เกิดขึ้นมาจากการแยกตัวประกอบ

การ plot ตำแหน่งของ poles และ zeros ของ transfer function ลงบนระนาบ  $z$ -plane ที่มี unit circle อยู่บนนั้นด้วย เรียกว่า pole-zero diagram (สำหรับระบบที่เป็น discrete-time system) โดยระบบที่มีความเสถียรภาพ pole จะต้องอยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วย นั่นคือขนาดของ pole ต้องมีค่าไม่เกิน 1

ขั้นตอนการออกแบบ IIR filter

1) Filter specifications คือ การกำหนดข้อกำหนดของการออกแบบว่าต้องการฟิลเตอร์ ในคุณลักษณะไหน

2) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ num และ den ของ transfer function  $H(z)$  ที่จะให้คุณลักษณะของ filter นั้นเป็นไปตามที่กำหนดไว้

3) การแปลงจาก transfer function ให้เป็น filter structure ที่เหมาะสม โดยทั่วไปโครงสร้างของ IIR filter จะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ Direct form I และ Direct form II ซึ่งนิยมใช้ Direct form II กับระบบที่เป็น 2nd order และโครงสร้าง cascade และ parallel ซึ่งประกอบด้วยระบบที่เป็น 2nd order ย่อยๆ หรือ 1<sup>st</sup> order

4) ผลลัพธ์ที่เกิดจากการคำนวณภายใน filter ถูกแทนด้วยจำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ของบิตที่มีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่เป็น Hardware Implement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

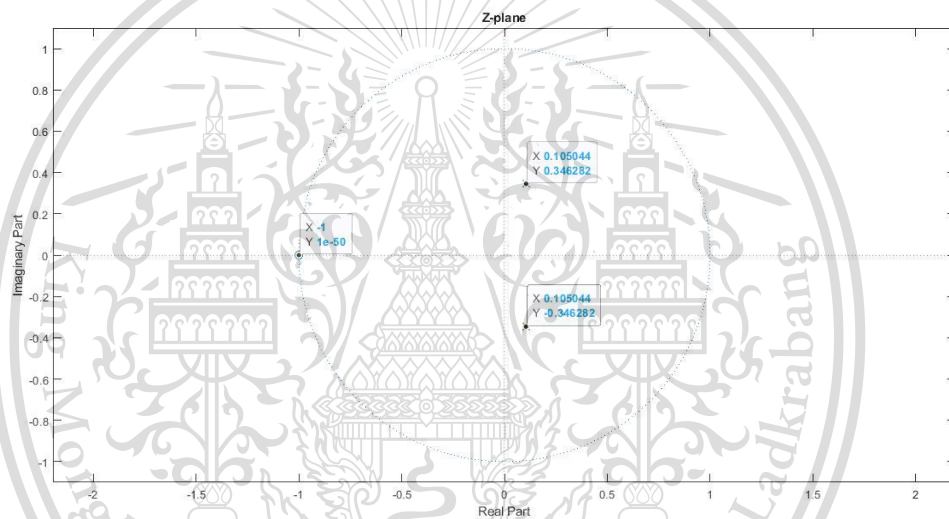
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.1.1.1 ทำการออกแบบ 2nd IIR Lowpass filter

โดยการออกแบบ 2nd IIR Lowpass filter กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz และ passband edge frequency (0.707) อยู่ที่ 3.25 kHz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

$$r = 1 - \left( \frac{f_c}{F_s} \right) \pi \quad (4.4)$$

ได้ผลการออกแบบดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3



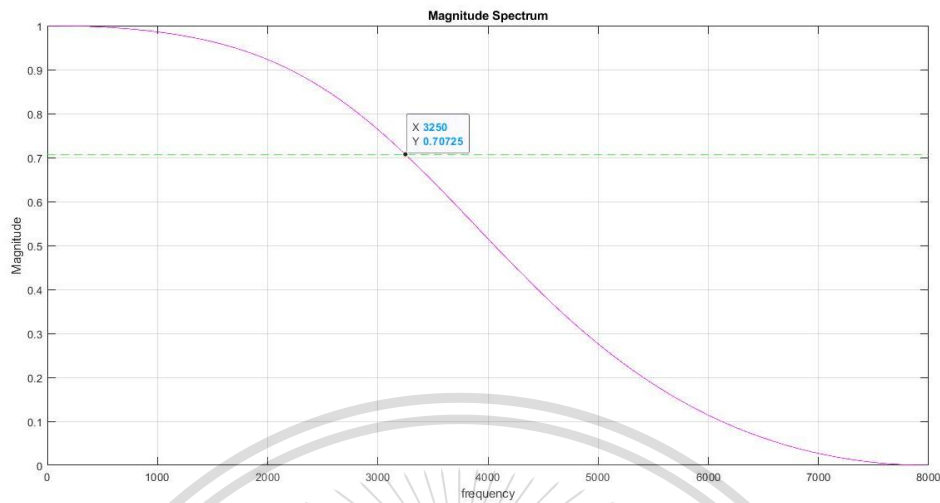
รูปที่ 4.1 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Lowpass filter

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า มี zero อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 1 จุด และตำแหน่งของ Poles อยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Lowpass filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

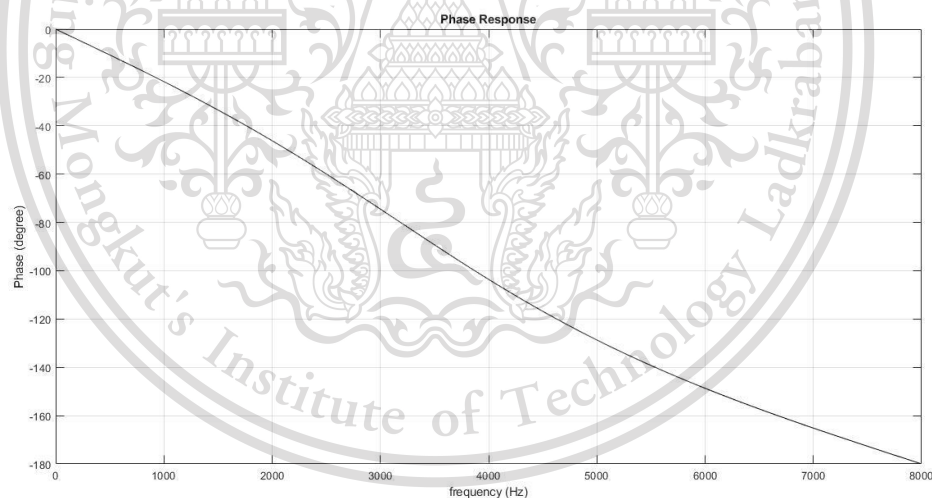
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ passband edge frequency จะมีค่า magnitude อยู่ 0.707 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีข้างต้น



รูปที่ 4.3 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Lowpass Filter

#### 4.1.1.2. ทำการออกแบบ 2nd IIR Highpass filter

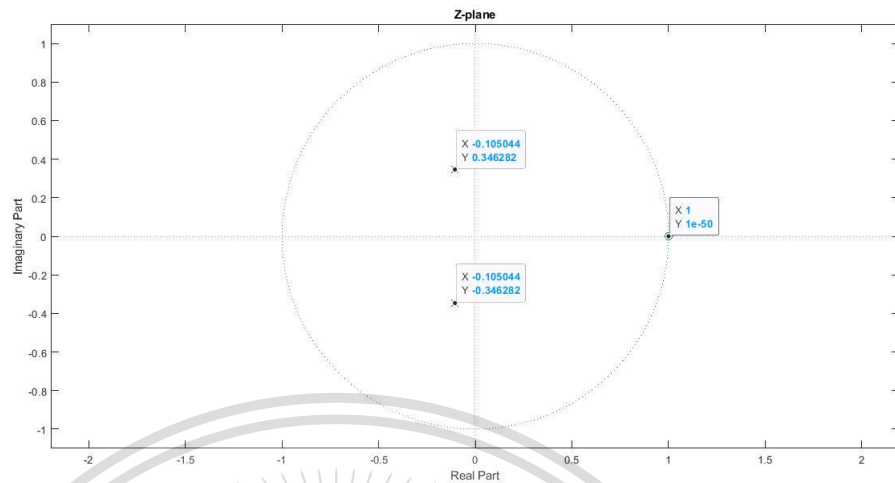
โดยการออกแบบ 2nd IIR Highpass filter กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz และ passband edge frequency (0.707) อยู่ที่ 4.75 kHz

และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4 ได้ผลการออกแบบดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

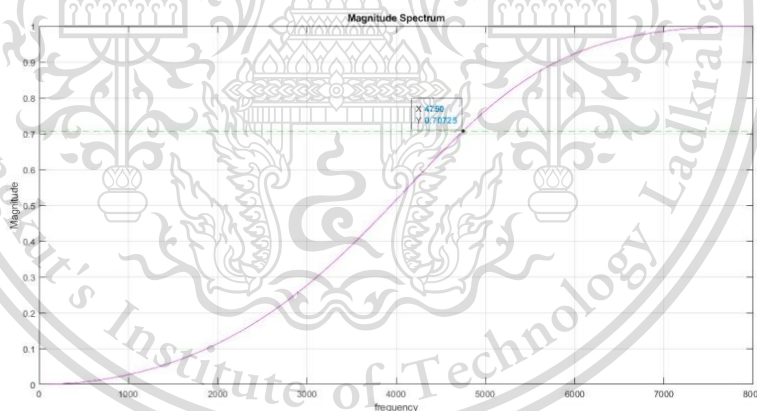
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Highpass filter

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่ามี zero อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 1 จุดและตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Highpass filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร



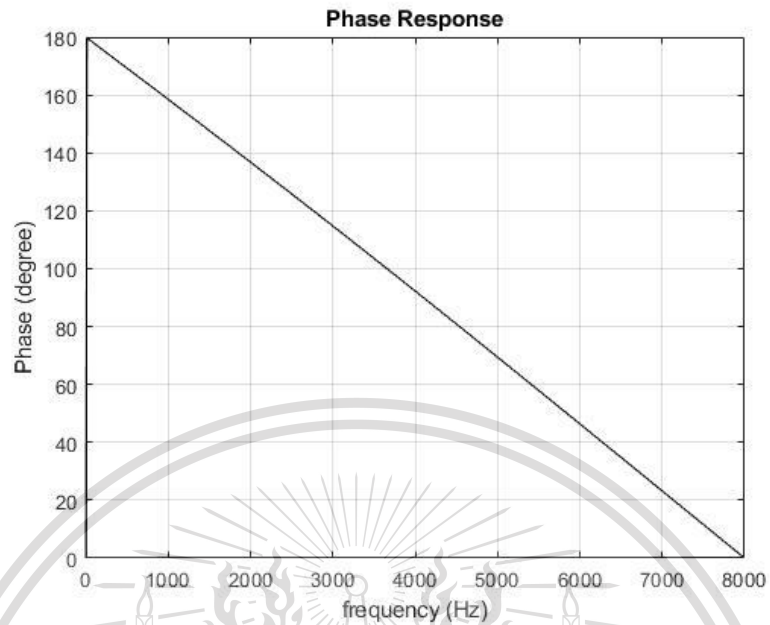
รูปที่ 4.5 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ passband edge frequency จะมีค่า magnitude อยู่ 0.707 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Highpass Filter

#### 4.1.1.3. ทำการออกแบบ 2nd IIR Bandpass filter

โดยการออกแบบ 2nd IIR Bandpass filter กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz, center frequency ( $f_c$ ) เท่ากับ 3.25 kHz, Bandwidth (BW) เท่ากับ 500 Hz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.5

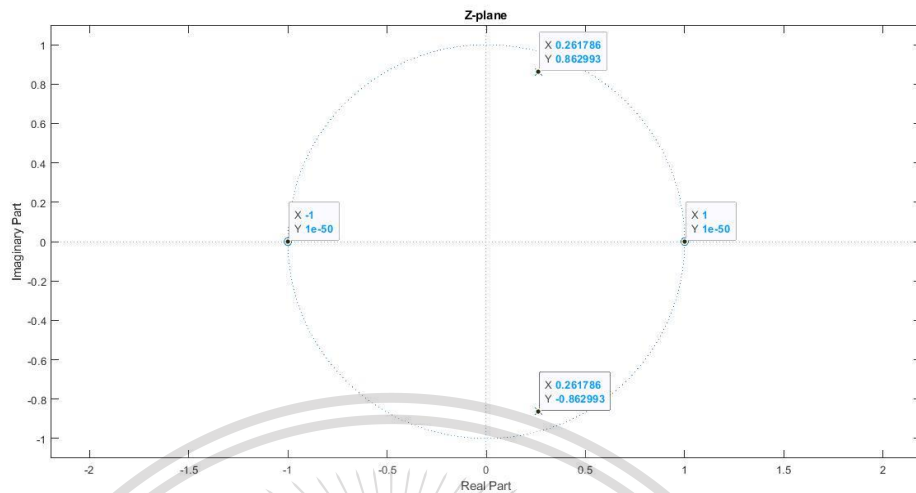
$$r = 1 - \left( \frac{BW}{F_s} \right) \pi \quad (4.5)$$

ได้ผลการออกแบบดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

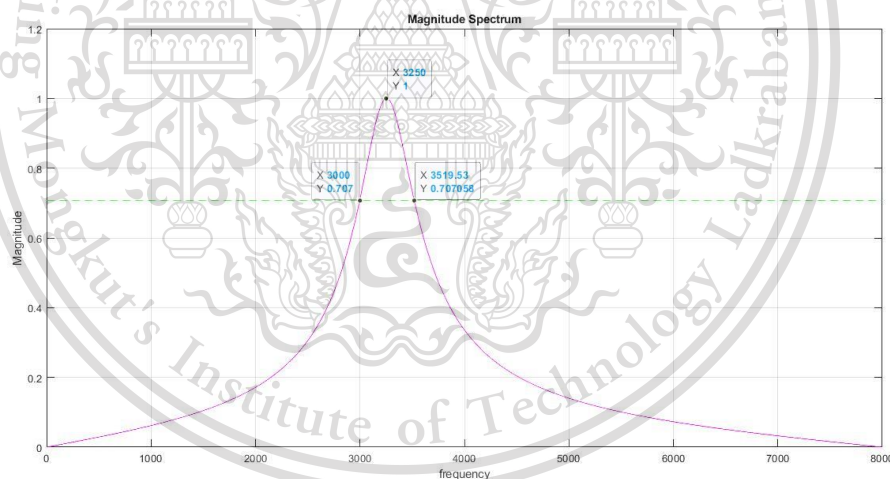
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Bandpass filter

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่ามี zeros อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 2 จุดและตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Bandpass filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร



รูปที่ 4.8 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter

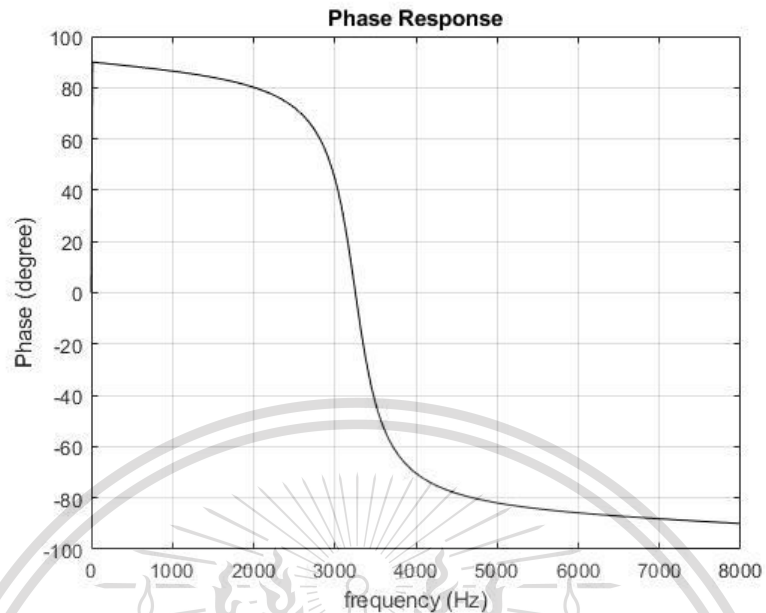
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ Center frequency ตรงตามที่กำหนดไว้และที่ค่า magnitude ที่ 0.707 จะเป็นตำแหน่ง passband edge frequency ซึ่งตรงตำแหน่งนั้น สามารถนำไปหาค่า bandwidth ได้ด้วยการนำตำแหน่งที่ passband edge frequency ทั้งสองมาลบกัน หรือที่ตำแหน่ง Center frequency ลบออกด้วย bandwidth/2 ซึ่งจะได้ค่า BW ออกมาใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

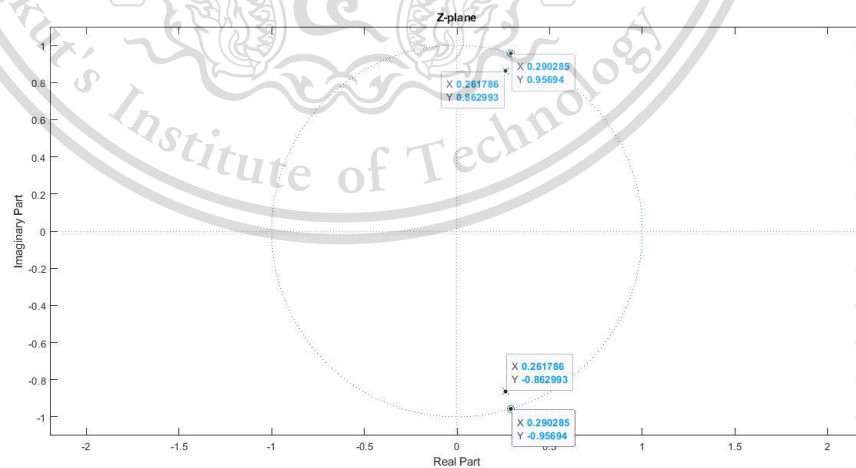
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Bandpass Filter

#### 4.1.14. ทำการออกแบบ 2nd IIR Bandstop filter

โดยการออกแบบ 2nd IIR Bandstop filter กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz, center frequency ( $f_c$ ) เท่ากับ 3.25 kHz, Bandwidth (BW) เท่ากับ 500 Hz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 ได้ผลการออกแบบดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12



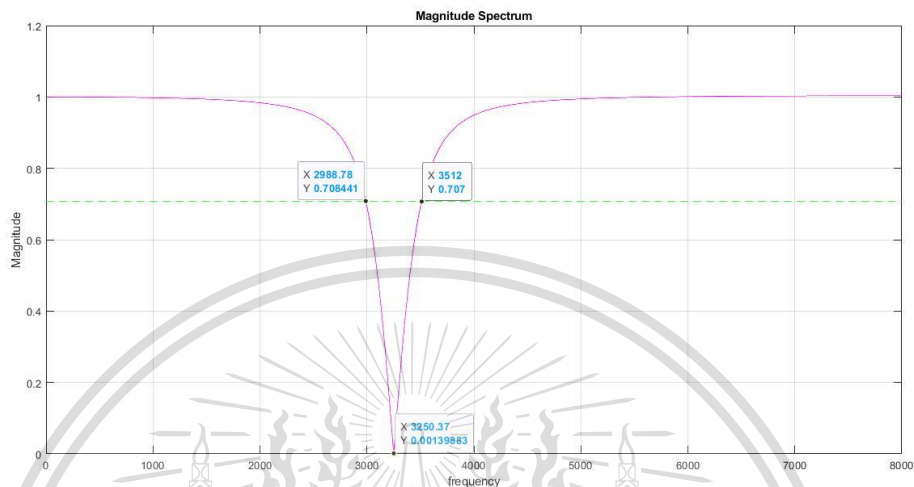
รูปที่ 4.10 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Bandstop filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

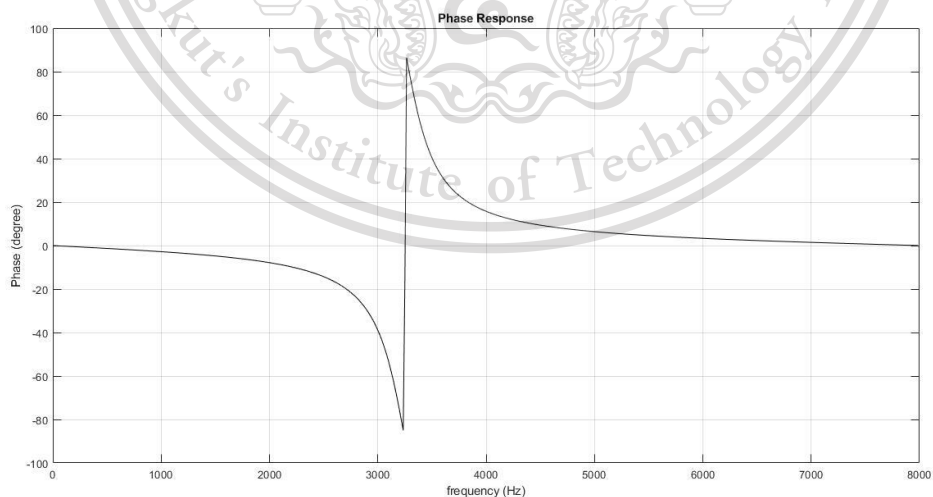
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่ามี zero อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 2 จุด และตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Bandstop filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร



รูปที่ 4.11 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Bandstop Filter

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ Center frequency ตรงตามที่กำหนดไว้และที่ค่า magnitude ที่ 0.707 จะเป็นตำแหน่ง passband edge frequency ซึ่งตรงตำแหน่งนั้น สามารถนำไปหาค่า bandwidth ได้ด้วยการนำตำแหน่งที่ passband edge frequency ทั้งสองมาลบกัน หรือที่ตำแหน่ง Center frequency ลบออกด้วย bandwidth/2 ซึ่งจะได้ค่า BW ออกมาใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.12 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Bandstop Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์นี้จะนำเอาวิธีการออกแบบ IIR ฟิเตอร์ด้วย pole zero placement นี้ไป implement ใช้งานกับบอร์ด STM32F769I ด้วยโปรแกรม Simulink โดยที่ในโปรแกรม Simulink นี้จะใช้บล็อกสำเร็จในโปรแกรมและการเขียนโค้ดโดยใช้บล็อก MATLAB Function จากนั้นจะทำการวัดผลตอบสนองความถี่ด้วยเครื่อง dynamic analyzer และวัดผลในโดเมนเวลาด้วยเครื่องออสซิลอโคป

#### 4.1.2 การออกแบบด้วยวิธี Bilinear transformation

วิธีการแปลง s-z ด้วย bilinear transform นี้เป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป สำหรับการแปลงจาก analog filter เป็น digital filter และสามารถใช้ได้กับทุกๆ frequency selective filter ไม่เกิด aliasing กับ Highpass และ Bandpass filter โดยในปริญญาานิพนธ์นี้จะใช้ bilinear transform แบบ butterworth โดยจะมีสมการ  $H_N(s)$  อยู่ในรูปดังสมการที่ 4.6

$$H_N(s) = \frac{1}{s^6 + 3.8637s^5 + 7.4641s^4 + 9.1416s^3 + 7.4641s^2 + 3.8637s + 1} \quad (4.6)$$

จากนั้นทำการแปลง  $H_N(s)$  เป็น  $H(s)$  สมการที่ 4.7 โดยการแทนค่า

$$s = \frac{s}{\Omega_c} = \frac{s}{0.7417} \quad \text{และ} \quad \Omega_c = \tan\left(\frac{\pi f_c}{F_s}\right)$$

$$H(s) = H_N(s) \Big|_{s = \frac{s}{\Omega_c} = \frac{s}{0.7417}} \quad (4.7)$$

$$= \frac{0.1665}{s^6 + 2.8657s^5 + 4.1061s^4 + 3.73s^3 + 2.2589s^2 + 0.8673s + 0.1665}$$

เมื่อได้  $H(s)$  แล้วต้องนำมาทำการแปลงเป็น  $H(z)$  ด้วย bilinear Pascal matrix ตัวอย่างเช่น ให้  $H(s)$  และ  $H(z)$  เป็นดังสมการที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

$$H(s) = \frac{A_0 + A_1s + A_2s^2}{B_0 + B_1s + B_2s^2} \quad (4.8)$$

นำสัมประสิทธิ์ num ของ  $H(s)$  มาเขียนคูณกับ bilinear Pascal matrix จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ num ของ  $H(z)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{bilinear} \\ \text{Pascal} \\ \text{Matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$$

จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ den ของ  $H(s)$  มาเขียนคูณกับ bilinear Pascal matrix จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ den ของ  $H(z)$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{bilinear} \\ \text{Pascal} \\ \text{Matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

เมื่อได้ค่า Num และ den ของสัมประสิทธิ์  $H(z)$  จะได้สมการ  $H(z)$  ออกมาดังสมการที่ 4.9

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (4.9)$$

การคำนวณหา Bilinear Pascal Matrix

1) First Row = 1 เสมอ

$$P_{0,j} = 1 \quad \text{for all } j$$

2) First Column ดังสมการที่ (4.10)

$$P_{i,0} = \binom{N}{i} = \frac{N!}{(N-i)!i!} \quad \text{for all } i \quad (4.10)$$

โดยที่  $N$  คือ order ของ filter

3) จากค่า First Row และ First Column นำมาหาค่าที่ตำแหน่งอื่นในเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{matrix} a & b \\ c & d \end{matrix} \quad \text{กำหนดให้ ค่า } d \text{ เป็นตำแหน่งที่ต้องการหาค่าตัวเลข}$$

$$\text{จะได้ } d = c - a - b$$

โดยปริยายนิพจน์นี้จะใช้ Bilinear Pascal Matrix 2 แบบ คือ

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{สำหรับ 2nd order filter}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และ

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 4 & 2 & 0 & -2 & -4 & -6 \\ 15 & 5 & -1 & -3 & -1 & 5 & 15 \\ 20 & 0 & -4 & 0 & 4 & 0 & -20 \\ 15 & -5 & -1 & 3 & -1 & -5 & 15 \\ 6 & -4 & 2 & 0 & -2 & 4 & -6 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ สำหรับ 6th order filter}$$

นำสมการที่ 4.7 มาหาค่า num และ den ได้ดังนี้

$$\text{num} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 4 & 2 & 0 & -2 & -4 & -6 \\ 15 & 5 & -1 & -3 & -1 & 5 & 15 \\ 20 & 0 & -4 & 0 & 4 & 0 & -20 \\ 15 & -5 & -1 & 3 & -1 & -5 & 15 \\ 6 & -4 & 2 & 0 & -2 & 4 & -6 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1665 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1665 \\ 0.999 \\ 2.4975 \\ 3.33 \\ 2.4975 \\ 0.999 \\ 0.1665 \end{bmatrix}$$

$$\text{den} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 4 & 2 & 0 & -2 & -4 & -6 \\ 15 & 5 & -1 & -3 & -1 & 5 & 15 \\ 20 & 0 & -4 & 0 & 4 & 0 & -20 \\ 15 & -5 & -1 & 3 & -1 & -5 & 15 \\ 6 & -4 & 2 & 0 & -2 & 4 & -6 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1665 \\ 0.8673 \\ 2.2589 \\ 3.73 \\ 4.1061 \\ 2.8657 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14.9945 \\ -16.689 \\ 18.6075 \\ -9.2812 \\ 3.6575 \\ -0.7018 \\ 0.0685 \end{bmatrix} \text{ ทำการหาค่า num}$$

เมื่อได้ค่า Num และ den ของสัมประสิทธิ์  $H(z)$  จะได้สมการ  $H(z)$  ออกมาดังสมการที่ 4.11

$$H(z) = \frac{0.1665 + 0.999z^{-1} + 2.4975z^{-2} + 3.33z^{-3} + 2.4975z^{-4} + 0.999z^{-5} + 0.1665z^{-6}}{14.9945 - 16.689z^{-1} + 18.6075z^{-2} - 9.2812z^{-3} + 3.6575z^{-4} - 0.7018z^{-5} + 0.0685z^{-6}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต (4.11)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

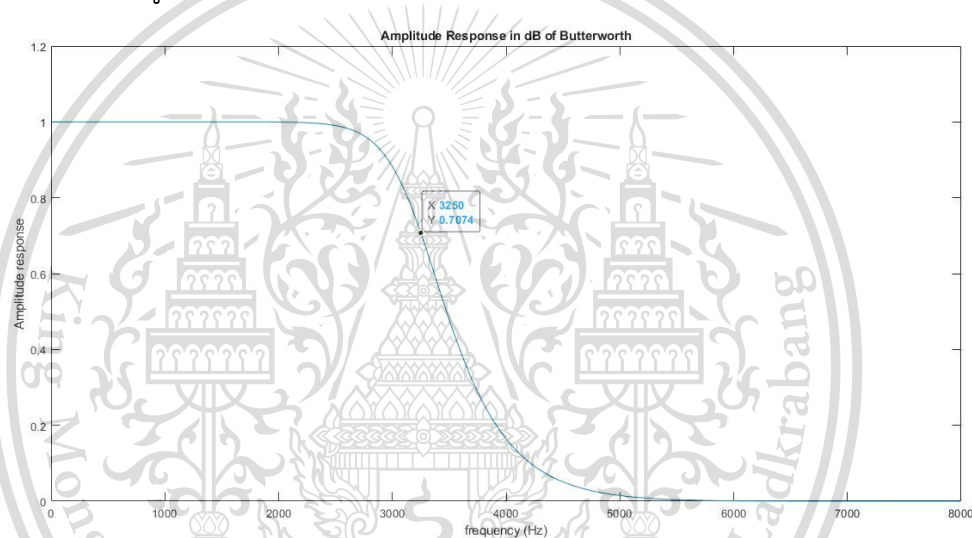
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการ denormalized ให้สัมประสิทธิ์ของ den ตัวแรกมีค่าเป็น 1 เพื่อให้ระบบมีความเสถียร จะได้สมการ  $H(z)$  ดังสมการที่ 4.10

$$\therefore H(z) = \frac{0.0111 + 0.0666z^{-1} + 0.1666z^{-2} + 0.2221z^{-3} + 0.1666z^{-4} + 0.0666z^{-5} + 0.0111z^{-6}}{1 - 1.113z^{-1} + 1.241z^{-2} - 0.619z^{-3} + 0.2439z^{-4} - 0.0468z^{-5} + 0.0046z^{-6}} \quad (4.12)$$

จากนั้นทำการ simulate กราฟ amplitude response ของ 6th order IIR Lowpass filter ได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟ Amplitude response ของ 6th order IIR Lowpass filter

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ passband edge frequency ตรงตามที่กำหนดไว้และที่ตำแหน่งนั้นจะได้ค่า amplitude ออกมาเป็น 0.707

ถ้า IIR filter ที่ออกแบบนั้นมี order สูงๆ สามารถทำให้เป็น order ต่ำได้ ด้วยการทำ cascade หรือ parallel

4.1.2.1 ออกแบบ IIR filter สูงด้วยวิธี bilinear transform แบบ Butterworth โดยการนำมาต่อ cascade กัน

ทำการแบ่งเป็น 2nd order IIR filter 3 ส่วน กรณีต่อแบบ cascade จะใช้ normalized analog transfer function ดังสมการที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษายามเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.13) การค้า  

$$H_N(s) = \frac{1}{(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + \sqrt{2}s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1)}$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การต่อแบบ cascade เป็นการนำ transfer function ของฟิลเตอร์แต่ละตัวมาคูณกัน ดังนั้น  $H_N(s)$  จะถูกแบ่งได้เป็นสมการที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 ดังนี้

$$H_{N1}(s) = \frac{1}{s^2 + 0.5176s + 1} \quad (4.14)$$

$$H_{N2}(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (4.15)$$

$$H_{N3}(s) = \frac{1}{s^2 + 1.9318s + 1} \quad (4.16)$$

เมื่อนำสมการที่ 12, 13 และ 14 ไปทำ frequency scaling จะได้ pre-warped analog filter ดังสมการที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

$$H_1(s) = \frac{0.5501}{s^2 + 0.3839s + 0.5501} \quad (4.17)$$

$$H_2(s) = \frac{0.5501}{s^2 + 1.0489s + 0.5501} \quad (4.18)$$

$$H_3(s) = \frac{0.5501}{s^2 + 1.4328s + 0.5501} \quad (4.19)$$

และเมื่อทำการหา digital transfer function จากสมการที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 โดยการใช้อนุกรมกำลัง bilinear s-z transformation จะได้ digital transfer function ของฟิลเตอร์ย่อยแต่ละตัวดังสมการที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

$$H_1(z) = \frac{0.2844 + 0.5689z^{-1} + 0.2844z^{-2}}{1 - 0.4653z^{-1} + 0.603z^{-2}} \quad (4.20)$$

$$H_2(z) = \frac{0.2117 + 0.4233z^{-1} + 0.2117z^{-2}}{1 - 0.3462z^{-1} + 0.1928z^{-2}} \quad (4.21)$$

$$H_3(z) = \frac{0.1844 + 0.3688z^{-1} + 0.1844z^{-2}}{1 - 0.3017z^{-1} + 0.0393z^{-2}} \quad (4.22)$$

Frequency response ที่ได้จากการออกแบบ 6th order IIR Butterworth filter โดยการต่อแบบ cascade จะเป็นการนำ digital transfer function ทั้ง 3 สมการมาคูณกัน ซึ่งจะได้ผลการออกแบบเช่นเดียวกับการใช้ normalize transfer function ดังสมการที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$H_N(s) = \frac{1}{s^6 + 3.8637s^5 + 7.4641s^4 + 9.1416s^3 + 7.4641s^2 + 3.8637s + 1} \quad (4.23)$$

4.1.2.2 ออกแบบ IIR filter สูงด้วยวิธี bilinear transform แบบ Butterworth โดยการนำมาต่อ parallel กัน

การต่อแบบ parallel เป็นการนำ transfer function ของฟิลเตอร์แต่ละตัวมาบวกกัน ดังนั้น  $H_N(s)$  จากสมการที่ 11 จะถูกแบ่งได้เป็นสมการที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 ซึ่งทั้ง 3 สมการจะต้องบวกกันแล้วค่าเศษของ  $H_N(s)$  รวมเท่ากับ 1 ดังนั้น จึงต้องใช้ partial fraction ในการหาค่าสัมประสิทธิ์  $A, B, C, D, E$  และ  $F$  ที่เหมาะสม

$$H_{N1}(s) = \frac{As + B}{s^2 + 0.5176s + 1} \quad (4.24)$$

$$H_{N2}(s) = \frac{Cs + D}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (4.25)$$

$$H_{N3}(s) = \frac{Es + F}{s^2 + 1.9318s + 1} \quad (4.26)$$

การใช้ Partial fraction หาค่าสัมประสิทธิ์ เริ่มจากการตั้งสมการตั้งสมการที่ 4.27

$$\frac{1}{(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + \sqrt{2}s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1)} = \frac{As + B}{s^2 + 0.5176s + 1} + \frac{Cs + D}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} + \frac{Es + F}{s^2 + 1.9318s + 1} \quad (4.27)$$

นำสมการที่ 4.27 แทนด้วยค่า

$(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + \sqrt{2}s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1)$  เพื่อให้ค่าด้านซ้ายของสมการเป็น 1 จะได้ผลลัพธ์ตั้งสมการที่ 4.28

$$1 = (As + B)(s^2 + \sqrt{2}s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1) + (Cs + D)(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + 1.9318s + 1) + (Ds + E)(s^2 + 0.5176s + 1)(s^2 + \sqrt{2}s + 1) \quad (4.28)$$

ทำการกระจายตัวเลขแล้วจัดกลุ่มตัวแปรใหม่ โดยเรียงจากเลขยกกำลัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ของตัวแปร  $s$  ได้ผลลัพธ์ตั้งสมการที่ 4.29  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{aligned}
1 &= s^5(A+C+E) + s^4(B+3.3460A+D+2.4494C+F+1.9318E) \\
&+ s^3(3.3460B+4.732A+2.4494D+3C+1.9318F+2.732E) \\
&+ s^2(4.732B+3.346A+3D+2.4494C+2.732F+1.9318E) \\
&+ s(3.3460B+A+2.4494D+C+1.9318F+E) + (B+D+F)
\end{aligned} \tag{4.29}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์จะได้สมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการหาค่า  $A, B, C, D, E$  และ  $F$  ดังสมการที่ 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 และ 4.35

$$B+D+F=1 \tag{4.30}$$

$$3.3460B+A+2.4494D+C+1.9318F+E=0 \tag{4.31}$$

$$4.732B+3.346A+3D+2.4494C+2.732F+1.9318E=0 \tag{4.32}$$

$$3.346B+4.732A+2.4494D+3C+1.9318F+2.732E=0 \tag{4.33}$$

$$B+3.346A+D+2.4494C+F+1.9318E=0 \tag{4.34}$$

$$A+C+E=0 \tag{4.35}$$

เมื่อทำการแก้ระบบสมการแล้วจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$A=0.482$$

$$B=-0.5774$$

$$C=-3.0474$$

$$D=-2.1548$$

$$E=2.6392$$

$$F=3.7322$$

ดังนั้น normalized analog transfer function ของฟิลเตอร์ย่อยแต่ละตัวจะเป็นดังสมการที่ 4.36, 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ

$$H_{N1}(s) = \frac{0.4082s - 0.5774}{s^2 + 0.5176s + 1} \tag{4.36}$$

$$H_{N2}(s) = \frac{-3.0474s - 2.1548}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \tag{4.37}$$

$$H_{N3}(s) = \frac{2.6392s + 3.7322}{s^2 + 1.9318s + 1} \tag{4.38}$$

จากนั้นนำสมการ 4.36, 4.37 และ 4.38 ไปแปลงเป็น  $H(s)$  ดังสมการที่เอกสารนี้เป็น 4.9 จะได้ดังสมการที่ 4.39, 4.40 และ 4.41 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$H_1(s) = \frac{0.3028s - 0.3176}{s^2 + 0.3839s + 0.5501} \quad (4.39)$$

$$H_2(s) = \frac{-2.2603s - 1.1854}{s^2 + 1.0489s + 0.5501} \quad (4.40)$$

$$H_3(s) = \frac{1.9575s + 2.0532}{s^2 + 1.4328s + 0.5501} \quad (4.41)$$

นำสมการ  $H(s)$  ที่ได้ทำการแปลงเป็น  $H(z)$  โดยใช้วิธี bilinear pascal matrix จะได้  $H(z)$  ดังสมการที่ 4.42, 4.43 และ 4.44

$$H_1(z) = \frac{-0.0077 - 0.3284z^{-1} - 0.3208z^{-2}}{1 - 0.4653z^{-1} + 0.603z^{-2}} \quad (4.42)$$

$$H_2(z) = \frac{-1.3258 - 0.9122z^{-1} + 0.4136z^{-2}}{1 - 0.3462z^{-1} + 0.1928z^{-2}} \quad (4.43)$$

$$H_3(z) = \frac{1.3446 + 1.3766z^{-1} + 0.0321z^{-2}}{1 - 0.3017z^{-1} + 0.0393z^{-2}} \quad (4.44)$$

#### 4.1.3 Peaking filter

Peaking filter เป็น filter รูปแบบเฉพาะซึ่งไม่ได้ใช้วิธีการออกแบบเหมือนกับ 2 วิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น เป็น IIR Filter รูปแบบหนึ่งซึ่ง transfer function ของ peaking filter ที่ปริญญาานิพนธ์นี้ใช้ในการออกแบบเป็นดังสมการที่ 4.45

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (4.45)$$

โดยที่เราจะนำ Peaking filter ไปใช้งานร่วมกับ low boost/cut shelving filter และ high boost/cut shelving filter ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้เป็น Parametric Equalizer

##### 4.1.3.1 Parametric Equalizer

Parametric Equalizer เป็นการประยุกต์ใช้งาน IIR filter โดยนำ IIR filter มาต่อกันแบบ cascade โดยผู้จัดทำทำการออกแบบจาก Transfer function ในรูปทั่วไปของ IIR filter ดังแสดงในสมการที่ 4.45 ซึ่งจะมีค่าที่ไม่ทราบค่า 5 ค่า คือ สัมประสิทธิ์และจำนวน band ที่ใช้อยู่ที่ 4 – 7 band ประกอบด้วย filter 3 ประเภทดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1) low boost/cut shelving filter

low boost/cut shelving filter เป็น low-pass filter ที่สามารถปรับค่าเกน (G) และ cutoff frequency (fc) ได้ ออกแบบจาก Transfer function ดังสมการที่ 4.46

$$H_{LS}(z) = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1) + 2(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 1)z^{-1} + (G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)z^{-2}}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2) + 2(\Omega^2 - G^{\frac{1}{2}})z^{-1} + (G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)z^{-2}} \quad (4.46)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

$$\Omega = \tan(\omega_c / 2)$$

$$G = 10^{\frac{\text{Gain}(dB)}{20}}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ Transfer function สมการที่ 4.45 กับสมการที่ 4.46 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$a_0 = \frac{2(\Omega^2 - G^{\frac{1}{2}})}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$a_1 = \frac{(G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_0 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_1 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(2G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_2 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

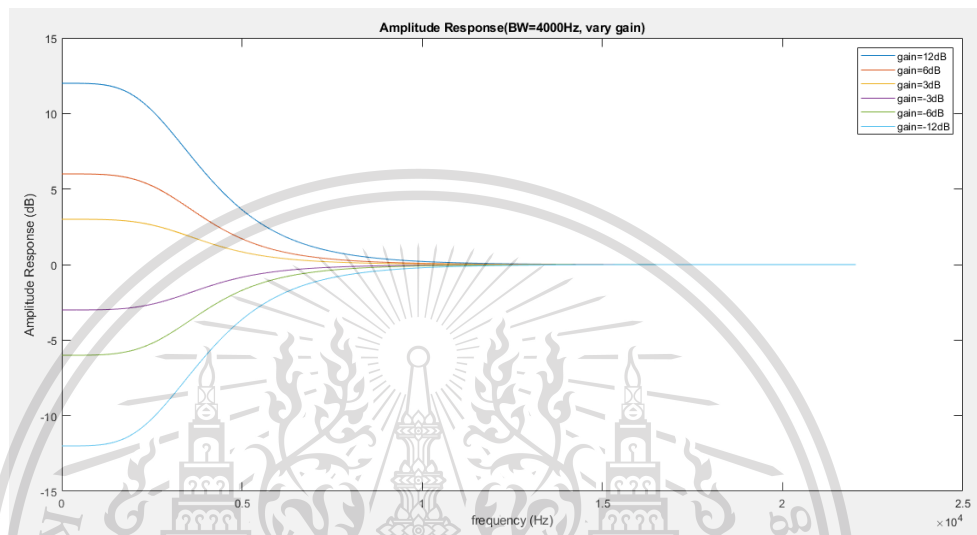
จากค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าเกน (G) และ cutoff frequency (fc) โดยพารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่าเกน และ พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับ cutoff frequency เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

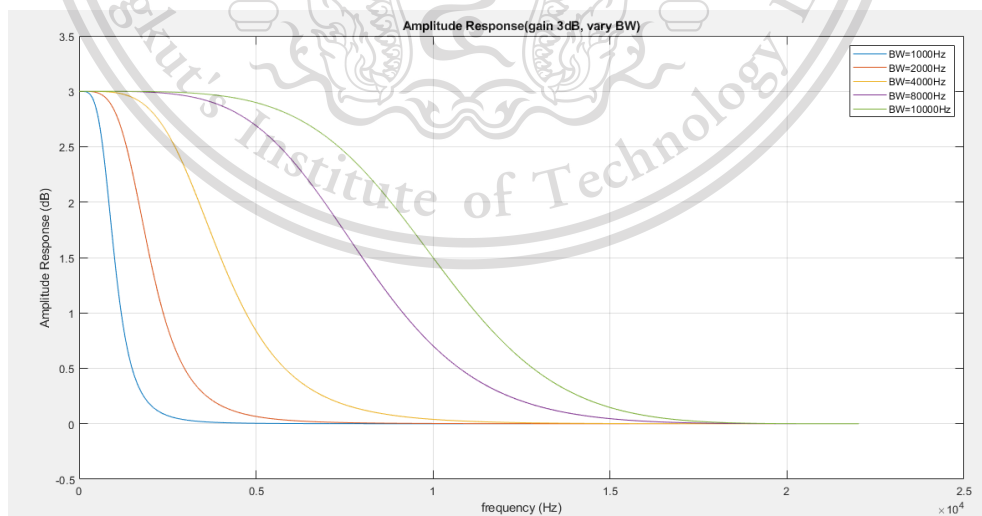
frequency นำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่ามาออกแบบ low boost/cut shelving filter จะได้คุณสมบัติดังนี้

1.1) ทดลองคงค่า = 4000 Hz และเปลี่ยนแปลงค่าเกน ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเกน

1.2) ทดลองคงค่าเกน  $G = 3$  dB และเปลี่ยนแปลงค่า เกน ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) peaking filter (EQ band)

peaking filter (EQ band) เป็น filter ที่สามารถปรับค่าเกน (G), cutoff frequency ( $f_c$ ) และ bandwidth (B) ได้ ออกแบบจาก Transfer function ตามสมการที่ 4.47 ซึ่งจะส่งผลให้ filter ที่ได้มีคุณสมบัติเป็น band-pass filter (peaking filter) หรือ band-stop filter (notch filter) ขึ้นอยู่กับค่าเกน

$$H_{PN}(z) = \frac{(\sqrt{G} + G \tan(B/2)) - (2\sqrt{G} \cos(\omega_c))z^{-1} + (\sqrt{G} - G \tan(B/2))z^{-2}}{(\sqrt{G} + \tan(B/2)) - (2\sqrt{G} \cos(\omega_c))z^{-1} + (\sqrt{G} - \tan(B/2))z^{-2}} \quad (4.47)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

$$B = 2\pi f_{BW} / f_s$$

$$G = 10^{\frac{\text{Gain(dB)}}{20}}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ Transfer function สมการที่ 4.45 กับสมการที่ 4.47 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$a_0 = \frac{-2\sqrt{G} \cos(\omega_c)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$a_1 = \frac{\sqrt{G} - \tan(B/2)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$b_0 = \frac{\sqrt{G} + G \tan(B/2)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$b_1 = \frac{-2\sqrt{G} \cos(\omega_c)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{G} - G \tan(B/2)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าเกน (G), cutoff frequency ( $f_c$ ) และ bandwidth (B) โดยพารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่าเกน พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับ cutoff frequency และ พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่า bandwidth ซึ่งเราสามารถกำหนดค่า quality factor ได้จากสมการที่ (4.48) แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่ามาออกแบบ peaking filter จะได้คุณสมบัติดังนี้

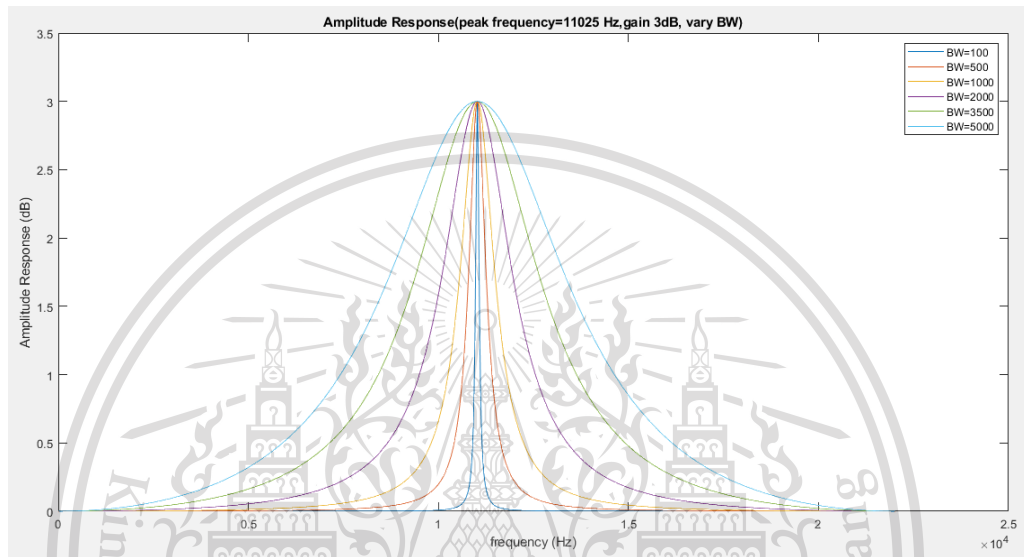
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

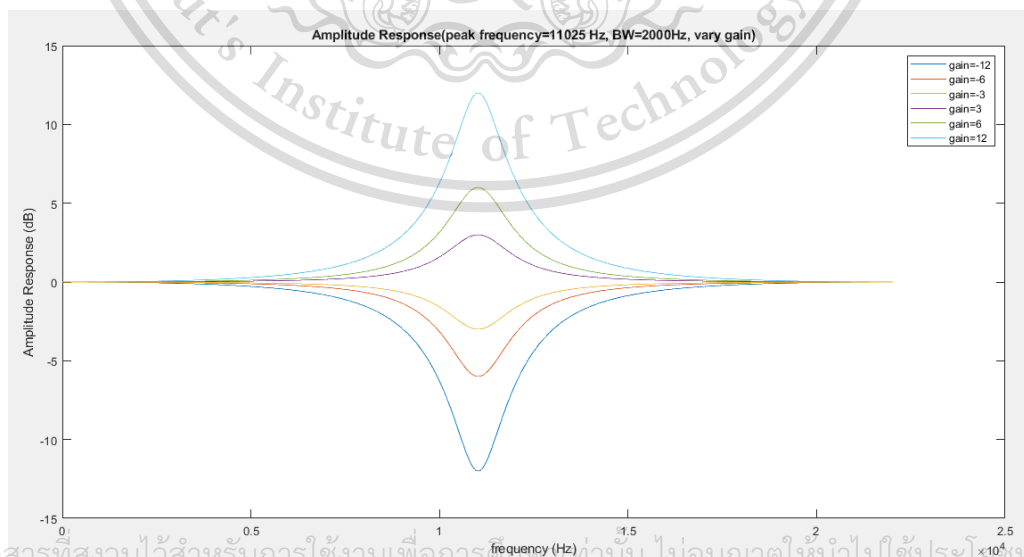
$$Q = \frac{\omega_c}{B} \tag{4.48}$$

2.1) ทดลองคงค่า = 11025 Hz, G = 3dB และเปลี่ยนแปลงค่า B ได้  
 กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า B

2.2) ทดลองคงค่า = 11025 Hz, B = 2000 Hz และเปลี่ยนแปลงค่า G  
 ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.17



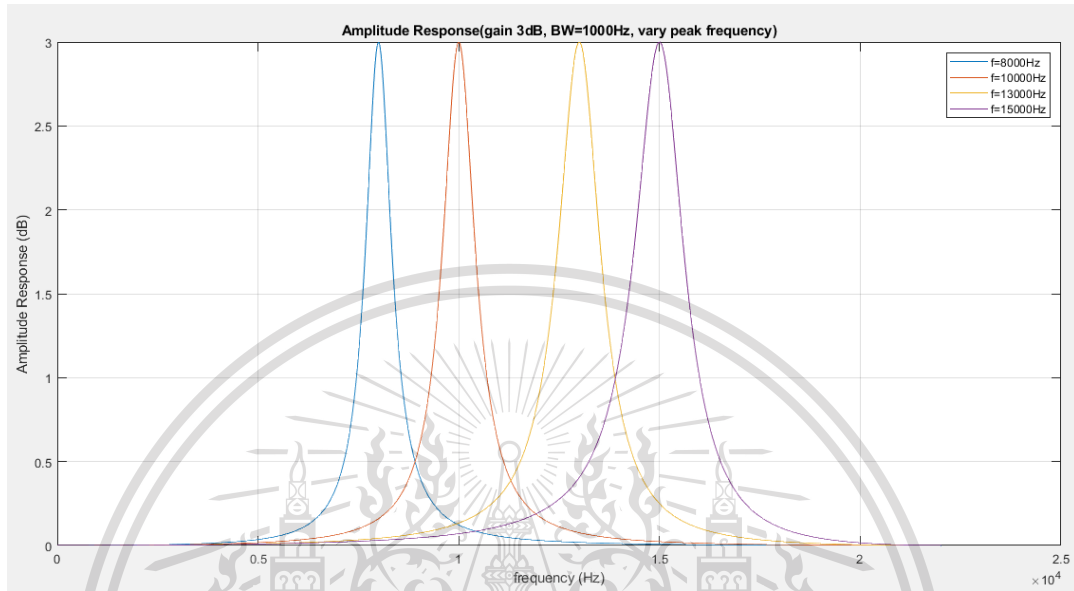
รูปที่ 4.17 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3) ทดลองคงค่า  $G = 3 \text{ dB}$ ,  $B = 1000 \text{ Hz}$  และเปลี่ยนแปลงค่า ได้  
กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า

3) high boost/cut shelving filter

high boost/cut shelving filter เป็น high-pass filter ที่สามารถปรับค่าเกน (G) และ cutoff frequency ได้ ออกแบบจาก Transfer function ดังสมการที่ 4.49

$$H_{HS}(z) = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2) - 2(G^{\frac{1}{2}} - \Omega^2)z^{-1} + (G^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)z^{-2}}{(G^2\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1) + 2(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 1)z^{-1} + (G^2\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)z^{-2}} \quad (4.49)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

$$\Omega = \tan(\omega_c / 2)$$

$$G = 10^{\frac{\text{Gain(dB)}}{20}}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ Transfer function สมการที่ 4.45 กับสมการที่ 4.49 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$a_0 = \frac{2G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 2}{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)}$$

$$a_1 = \frac{G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

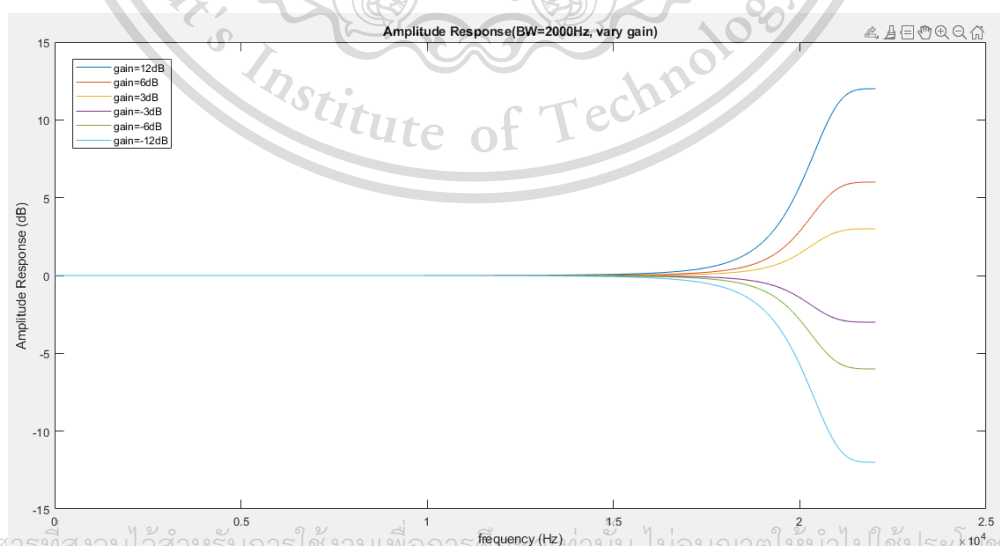
$$b_0 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_1 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(-2G^{\frac{1}{2}} + 2\Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_2 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าเกน (G) และ cutoff frequency (fc) โดยพารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่าเกน และ พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับ cutoff frequency นำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่ามาออกแบบ high boost/cut shelving filter จะได้คุณสมบัติดังนี้

3.1) ทดลองคงค่า = 20050 Hz และเปลี่ยนแปลงค่าเกน ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.19

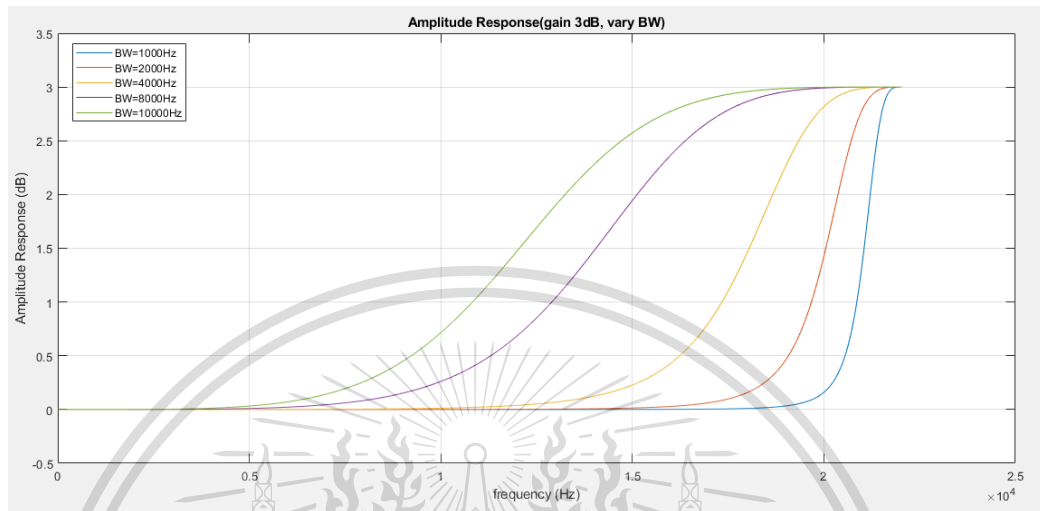


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.19 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเกน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

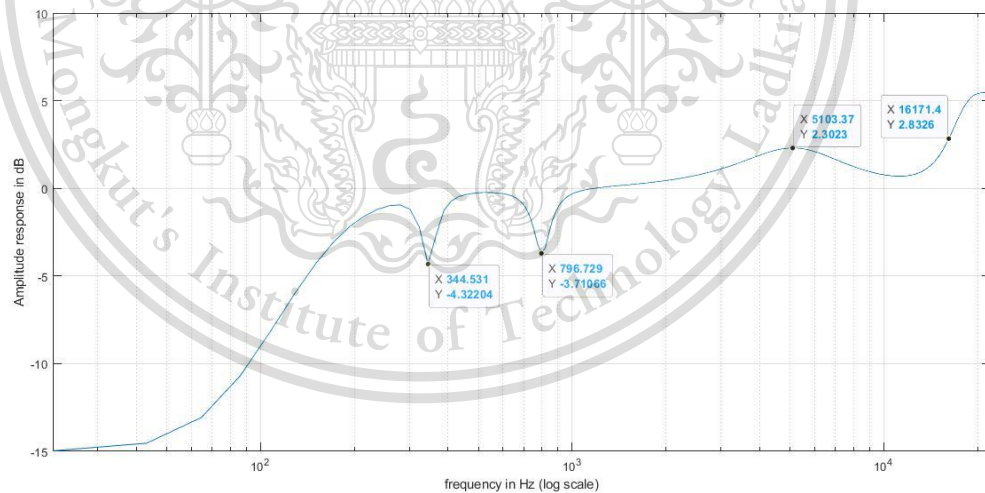
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2) ทดลองคงค่าเกน  $G = 3$  dB และเปลี่ยนแปลงค่า ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า และเมื่อทำการพล็อตกราฟ Amplitude response ของ parametric equalizer จะได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟ Amplitude response ของ parametric equalizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 4.2 โครงสร้าง

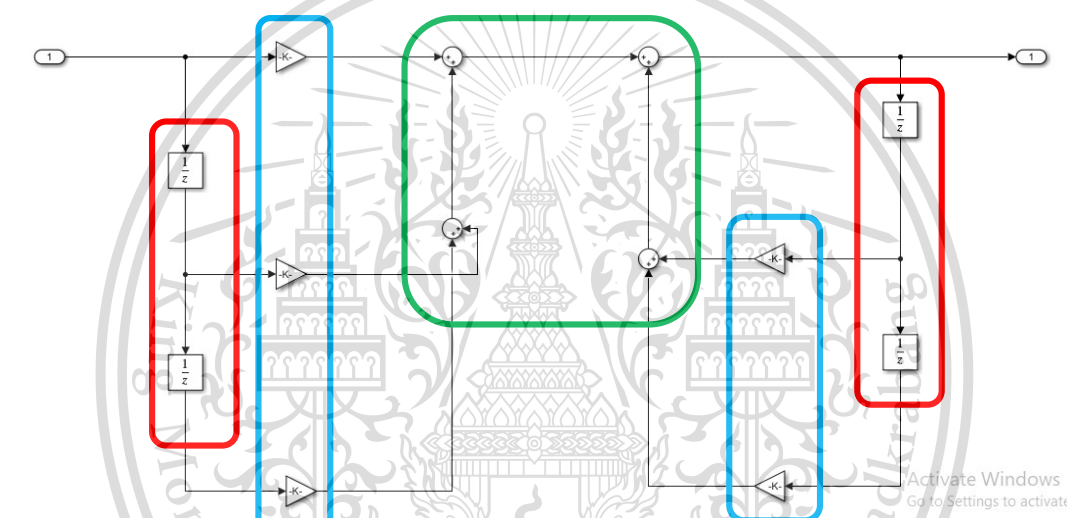
### 4.2.1 IIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี poles-zeros placement

การ Implement ของ IIR filter แบ่งเป็น 2 แบบ

#### 4.2.1.1 Direct form I

โครงสร้าง IIR filter แบบ Direct form I ดังรูปที่ 4.22 นั้นจะมี ส่วนประกอบดังนี้

- 1) unit delay (กรอบสีแดงหรือกรอบขวาสุดและซ้ายสุดของรูป 4.22)
- 2) gain (กรอบสีฟ้าหรือกรอบที่ถัดเข้ามาจากกรอบสีแดงทั้ง 2 ข้าง)
- 3) sum (กรอบสีเขียวหรือกรอบที่อยู่ตรงกลาง)



รูปที่ 4.22 โครงสร้าง IIR filter แบบ Direct form I

#### 4.2.1.2 Direct form II

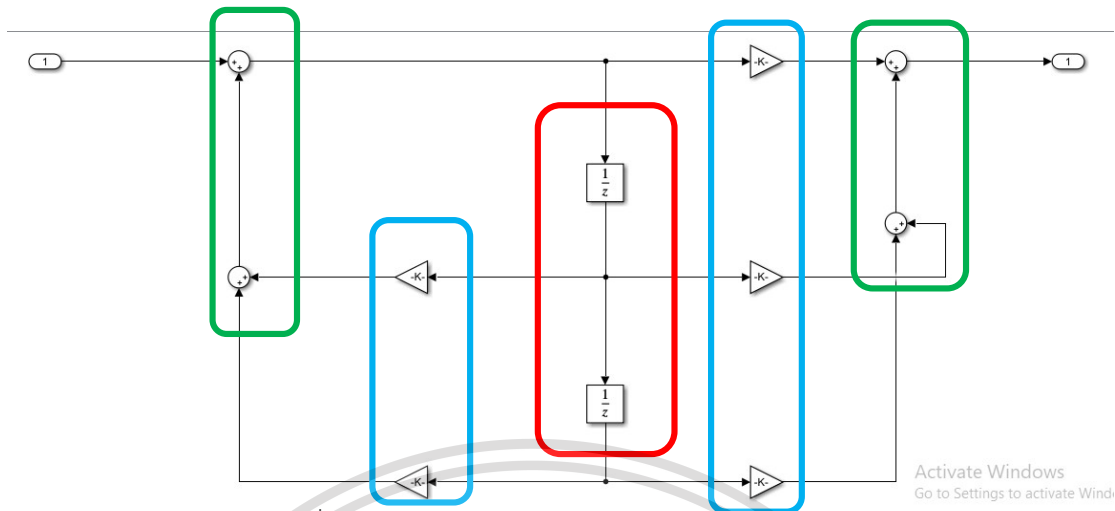
โครงสร้าง IIR filter แบบ Direct form II ดังรูปที่ 4.23 นั้นจะมีความแตกต่างจาก Direct form I คือ จำนวน gain ลดลง และมีส่วนประกอบดังนี้

- 1) unit delay (กรอบสีแดงหรือกรอบที่อยู่ตรงกลาง)
- 2) gain (กรอบสีฟ้าหรือกรอบที่ถัดเข้ามาจากกรอบสีเขียวทั้ง 2 ข้าง)
- 3) sum (กรอบสีเขียวหรือกรอบขวาสุดและซ้ายสุดของรูป 4.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

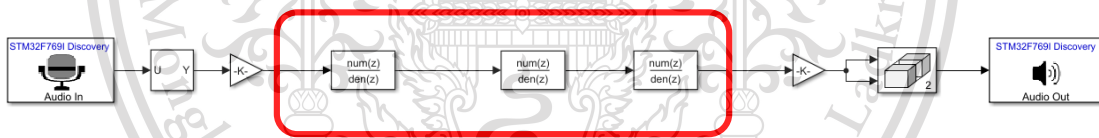


รูปที่ 4.23 โครงสร้าง IIR filter แบบ Direct form II

โดยที่ปัญญานิพนธ์นี้เลือกใช้ โครงสร้าง IIR filter แบบ Direct form II เนื่องด้วยแบบ Direct form II นั้นใช้ทรัพยากรน้อยกว่าแบบ Direct form I ตามทฤษฎีข้างต้น

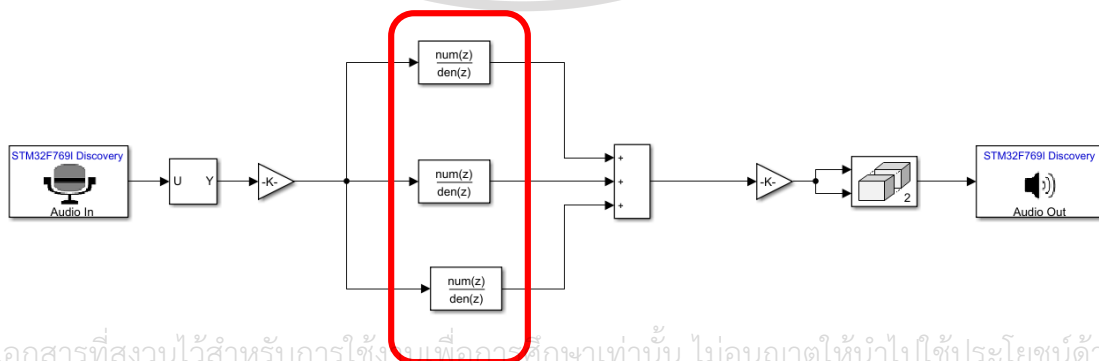
#### 4.2.2 IIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Bilinear transform

1) การออกแบบ IIR filter สูงด้วยวิธี bilinear transform แบบ Butterworth โดยการนำมาต่อ cascade กัน ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ออกแบบ IIR filter แบบ cascade

2) การออกแบบ IIR filter สูงด้วยวิธี bilinear transform แบบ Butterworth โดยการนำมาต่อ parallel กัน ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ออกแบบ IIR filter แบบ parallel

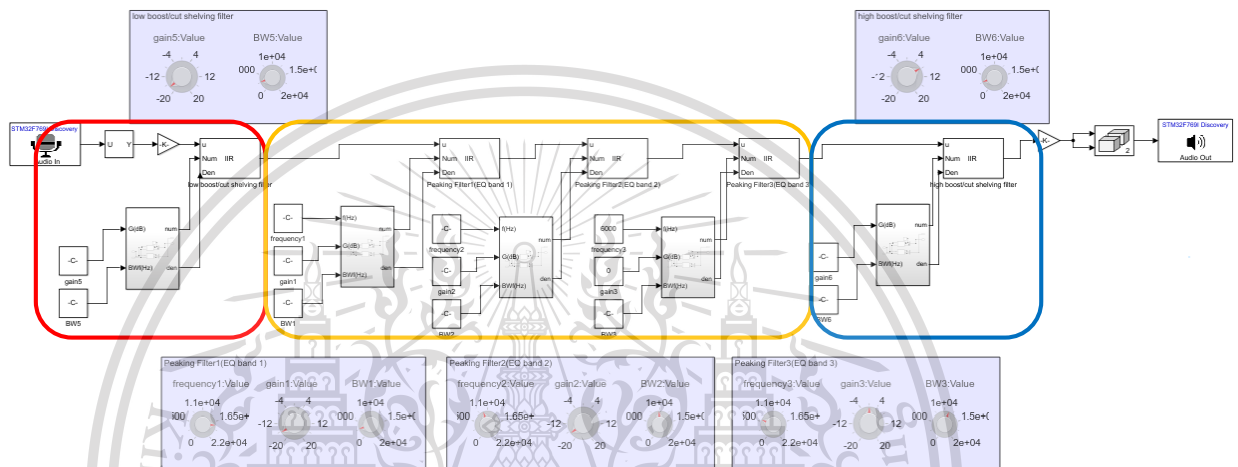
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

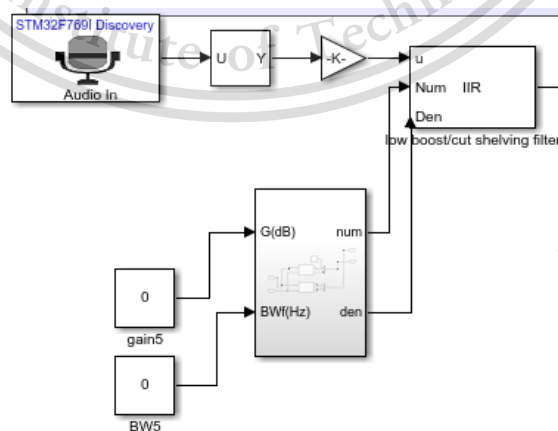
### 4.2.3 IIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Peaking filter

ทำการ implement วงจร Parametric Equalizer โดยใช้ block ต่างๆในโปรแกรม Simulink โดยจะมีส่วน low boost/cut shelving filter และ ส่วน high boost/cut shelving filter ชนิดละ 1 band และส่วน peaking filter (EQ band) ทั้งหมด 3 band ดังรูปที่ 4.26 แล้วทำการ build ลงบอร์ด STM32F769I แล้วทำการเก็บผลจากการวัด frequency response ของระบบเพื่อเปรียบเทียบกับ frequency response ที่ได้จากการออกแบบต่อไป



รูปที่ 4.26 วงจร Parametric Equalizer

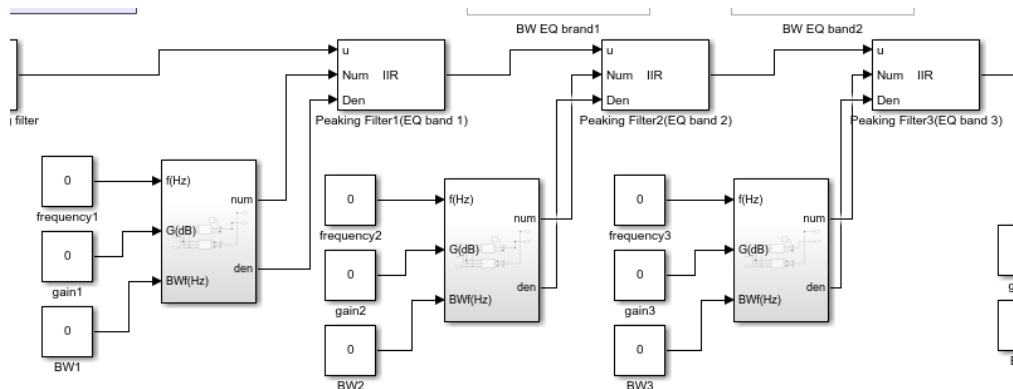
จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่า กรอบสีแดง (กรอบทางด้านซ้ายมือ) คือ low boost/cut shelving filter 1 band ดังรูปที่ 4.27 กรอบสีเหลือง (กรอบตรงกลาง) คือ ส่วน peaking filter (EQ band) 3 band ดังรูปที่ 4.28 และกรอบสีน้ำเงิน (กรอบทางด้านขวามือ) คือ high boost/cut shelving filter 1 band ดังรูปที่ 4.29



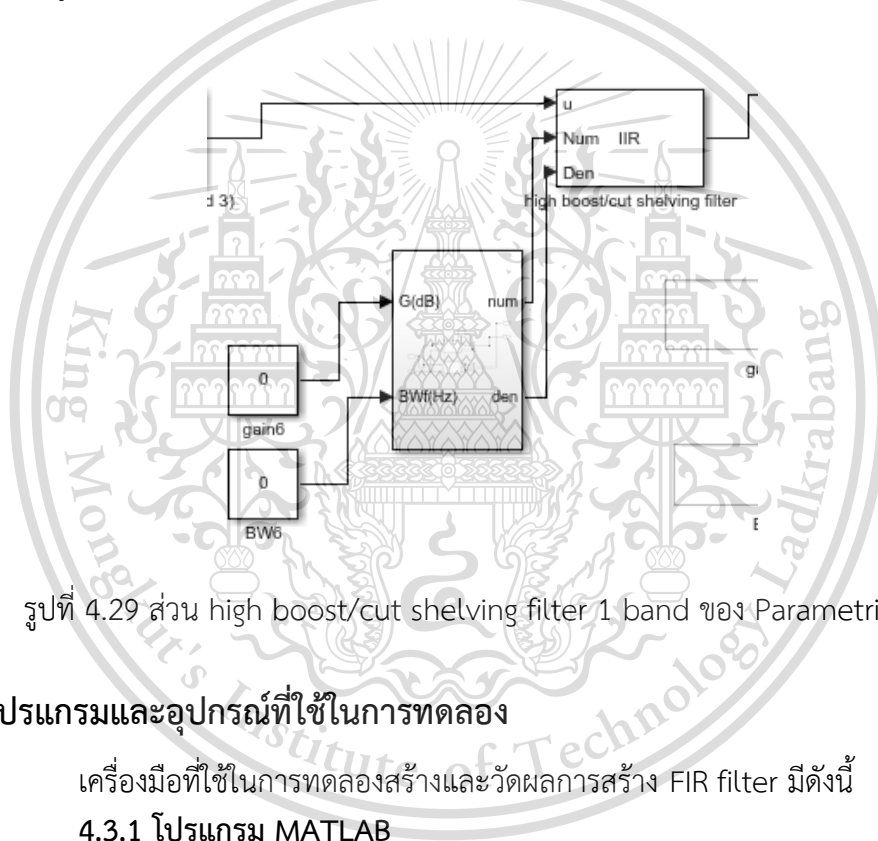
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.27 ส่วน low boost/cut shelving filter 1 band ของ Parametric EQ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.28 ส่วน peaking filter (EQ band) 3 band ของ Parametric EQ



รูปที่ 4.29 ส่วน high boost/cut shelving filter 1 band ของ Parametric EQ

### 4.3 โปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสร้างและวัดผลการสร้าง FIR filter มีดังนี้

#### 4.3.1 โปรแกรม MATLAB

ใช้สำหรับคำนวณและออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ รวมทั้งทำการพล็อตกราฟ ทำผลการ simulation สำหรับการเปรียบเทียบและตรวจสอบผลการ implement หรือการสร้างฟิลเตอร์

#### 4.3.2 โปรแกรม Simulink

ใช้สำหรับสร้างโครงสร้างสำหรับการสร้างฟิลเตอร์ แล้วทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I เพื่อวัดผลการสร้างฟิลเตอร์หรือนำไปใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.3.3 บอร์ด STM32F769I

ใช้สำหรับ implement หรือ สร้างฟิลเตอร์และวงจรต่างๆ จากโปรแกรม Simulink โดยเมื่อทำการ build เครื่องมือต่างๆ จากโปรแกรม Simulink แล้วจะทำการต่อสายสัญญาณระหว่างบอร์ดกับเครื่อง Dynamic Signal Analyzer หรือ Oscilloscope เพื่อวัดค่าต่างๆต่อไป

### 4.3.4 Dynamic Signal Analyzer

วัดผลการสร้างฟิลเตอร์ โดยจะใช้ในการตรวจสอบว่า Frequency Response ที่ได้จากการสร้างฟิลเตอร์โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบ ตรงกับ Frequency Response ที่ทำการ simulation ไว้หรือไม่

### 4.3.5 Digital Oscilloscope

ใช้วัดสัญญาณใน time domain เพื่อตรวจสอบว่าฟิลเตอร์ที่สร้างนั้นมีคุณลักษณะตรงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่

## 4.4 การจับเก็บผลการทดลอง

การออกแบบ digital filter จะสำเร็จเมื่อได้รับค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ออกมา โดยการจับเก็บผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

### 4.4.1 วัดผลใน frequency domain

จะทำการ simulation หรือพล็อต Frequency Response ของฟิลเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ไว้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ Frequency Response ของฟิลเตอร์ที่ได้มาจากการวัดโดยใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer

### 4.4.2 วัดผลใน time domain

ใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ทำการสร้างสัญญาณความถี่ต่างๆ เพื่อตรวจสอบว่าที่ความถี่ที่ทำการตรวจสอบ ฟิลเตอร์สามารถทำงานได้ตรงตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้หรือไม่

โดยการเก็บและวัดผลทั้ง 2 ส่วนหากผลลัพธ์ที่ได้ตรงตามผลการ simulation หรือคุณลักษณะของฟิลเตอร์ จะถือว่าการออกแบบและสร้างฟิลเตอร์นั้นๆ สำเร็จสามารถนำไปใช้งานได้ แต่หากผลลัพธ์ที่ได้ไม่ตรงตามผลการ simulation หรือ คุณลักษณะของฟิลเตอร์ ก็จะต้องนำมาตรวจสอบใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเพื่อหาสาเหตุของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นและทำการแก้ไขให้บรรลุคุณลักษณะที่กำหนดไว้

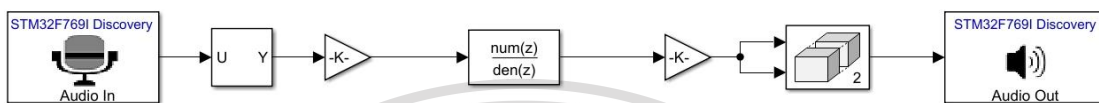
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

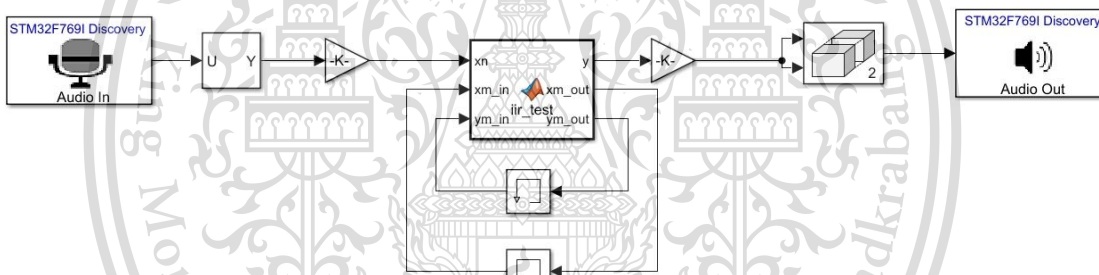
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.5 ผลการทดสอบการสร้าง IIR filter ด้วยวิธี Pole zero placement

นำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบมาทำการ implement ลงบอร์ด STM32F769I ซึ่งปริญญาณิพนธ์นี้ได้ทดลองทำการ implement FIR filter ทั้ง 4 รูปแบบ โดยการต่อบล็อก Simulink ดังรูปที่ 4.30 และต่อบล็อก Simulink ด้วย MALAB function ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 โครงสร้าง Simulink block ที่ใช้ในการสร้าง IIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I



รูปที่ 4.31 โครงสร้าง MATLAB Function block ที่ใช้ในการสร้าง IIR filter เพื่อทำการ build ลงในบอร์ด STM32F769I

#### 4.5.1 วัดผลการสร้าง IIR filter ใน frequency domain

ใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัด Frequency Response ของฟิลเตอร์ รูปแบบต่างๆ ได้ผลดังนี้

##### 4.5.1.1 บล็อก IIR Filter ในโปรแกรม Simulink

##### 1) ผลการสร้าง 2nd IIR Lowpass filter

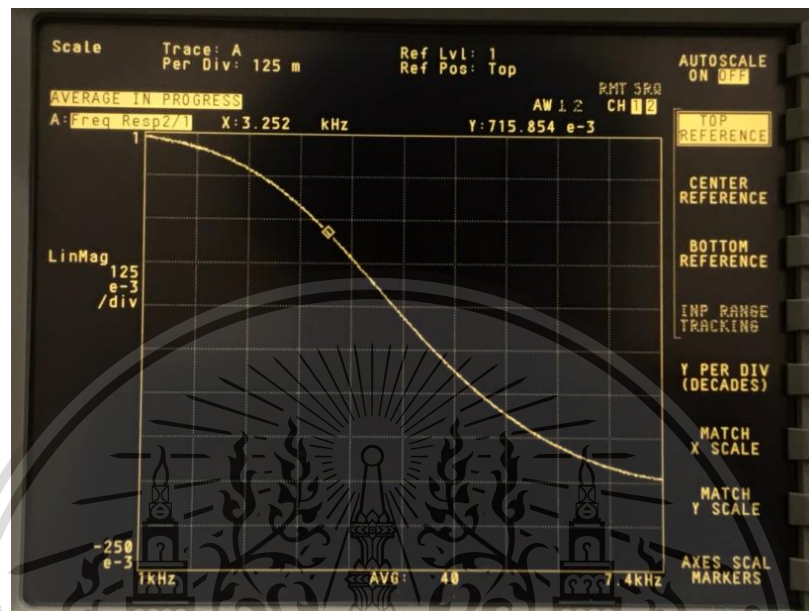
จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

edge frequency 3.25 kHz มีค่าประมาณ 0.716 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 4.32 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

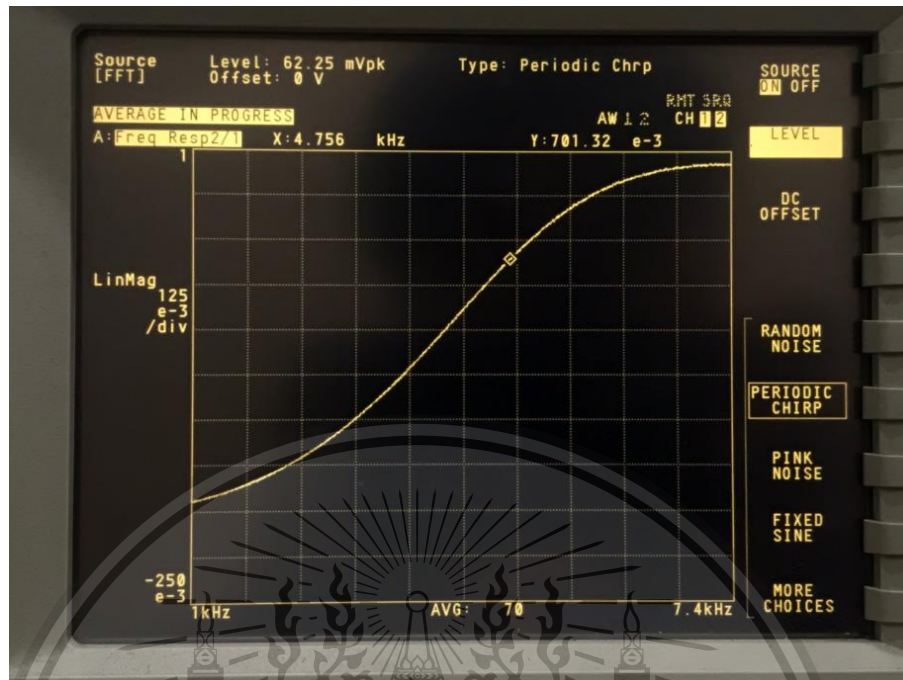
## 2) ผลการสร้าง 2nd IIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 4.75 kHz มีค่าประมาณ 0.701 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.33 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

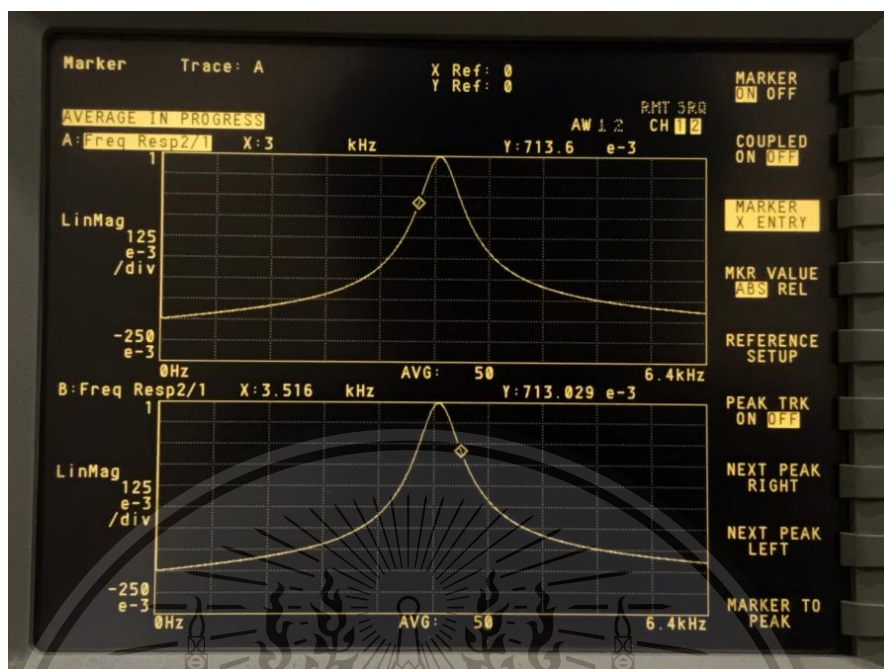
### 3) ผลการสร้าง 2nd IIR Bandpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.34 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าประมาณ 0.714 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.34 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

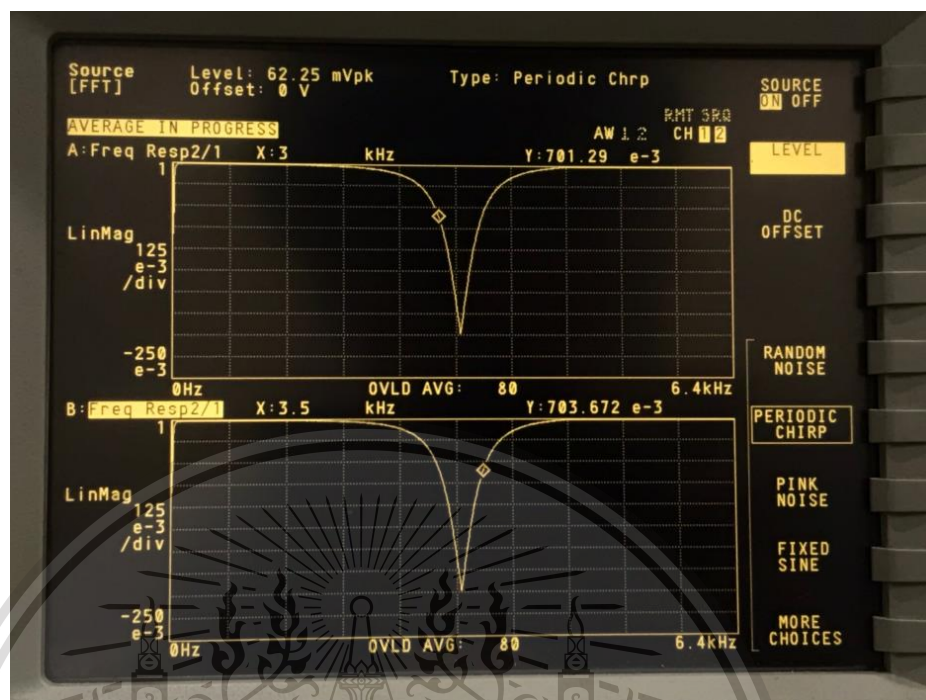
#### 4) ผลการสร้าง 2nd IIR Bandstop filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าประมาณ 0.701 และ 0.704 ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.35 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandstop Filter สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter โดยใช้ Dynamic analyzer

#### 4.5.1.2 บล็อก MATLAB Function ในโปรแกรม Simulink

##### 1) ผลการสร้าง 2nd IIR Lowpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.25 kHz มีค่าประมาณ 0.703 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.36 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

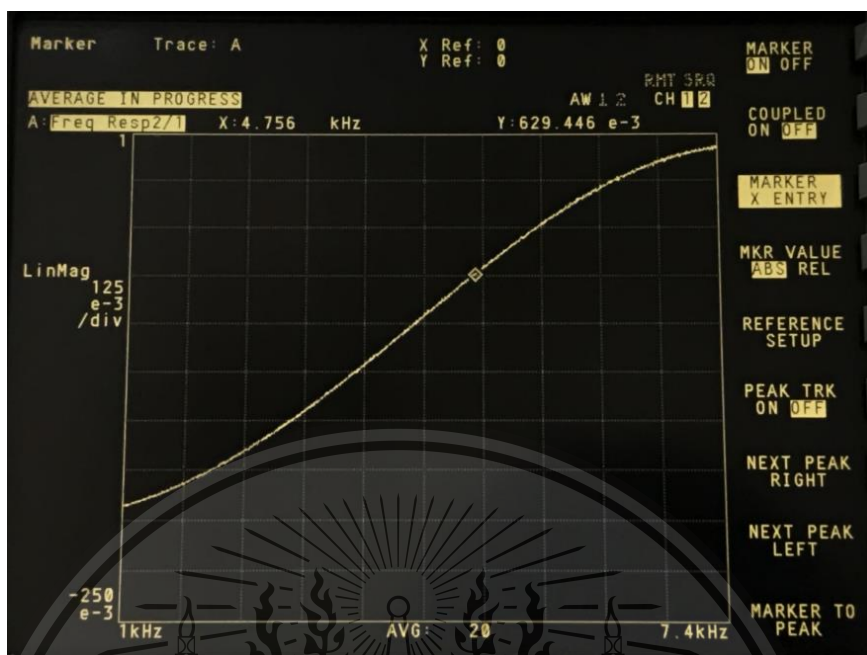
## 2) ผลการสร้าง 2nd IIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.37 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 4.75 kHz มีค่าประมาณ 0.629 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.37 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter ที่สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

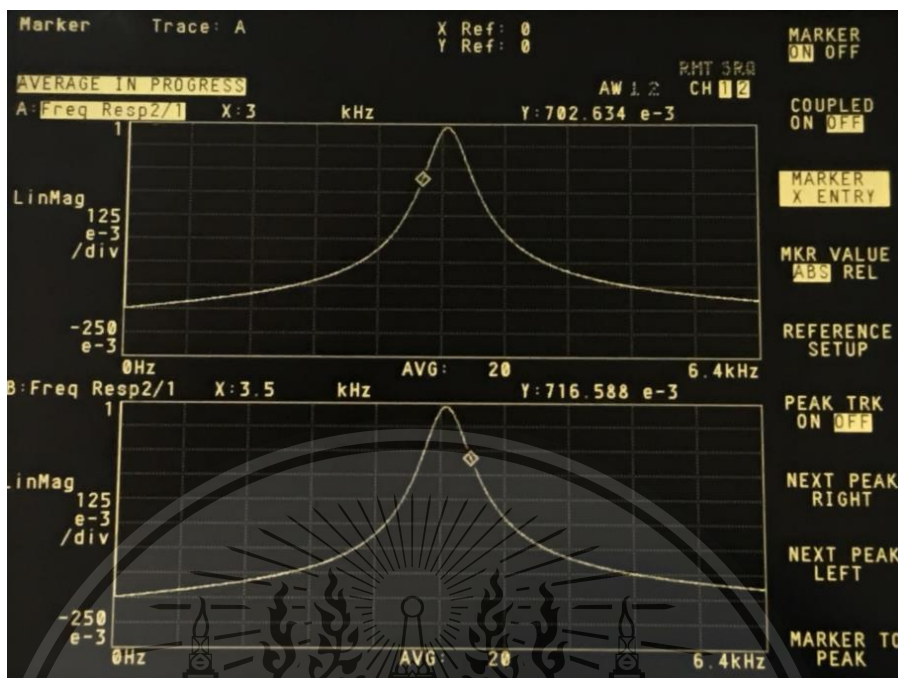
### 3) ผลการสร้าง 2nd IIR Bandpass filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าประมาณ 0.703 และ 0.717 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.38 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

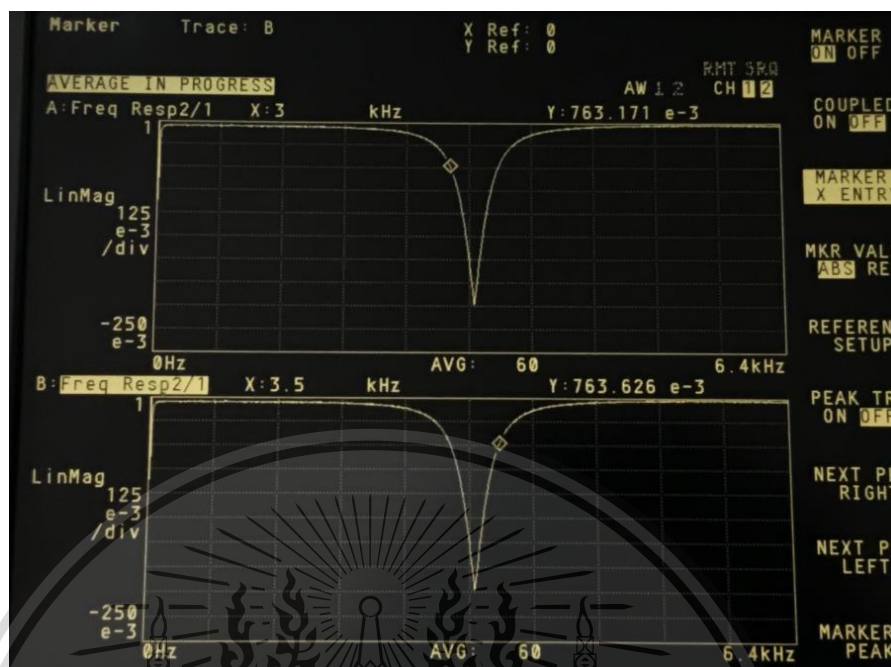
#### 4) ผลการสร้าง 2nd IIR Bandstop filter

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.39 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าประมาณ 0.763 และ 0.764 ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.39 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR bandstop Filter สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function โดยใช้ Dynamic analyzer

#### 4.5.2 วัดผลการสร้าง IIR filter ใน time domain

ใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดค่าสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับค่าสัญญาณอินพุต โดยการป้อนสัญญาณขาเข้าที่คงที่แอมพลิจูด ปรับค่าความถี่ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ เพื่อตรวจสอบว่าที่ความถี่นั้นๆฟิลเตอร์สามารถทำงานได้ตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่

##### 4.5.2.1 บล็อก IIR Filter ในโปรแกรม Simulink

##### 1) ผลการสร้าง 2nd IIR Lowpass filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

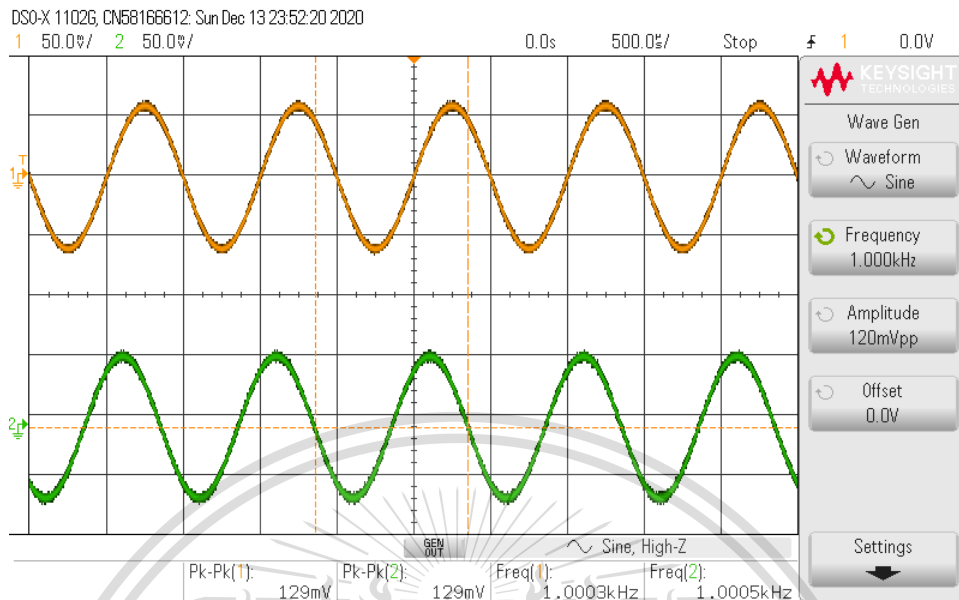
##### 1.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp

ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.40 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

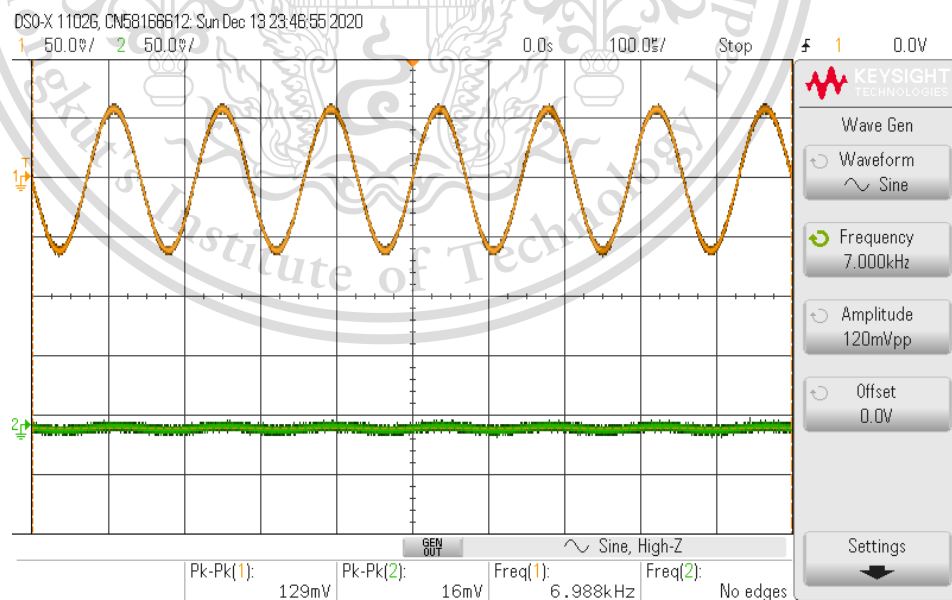
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.40 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1kHz ของ 2nd IIR Lowpass Filter

1.2) ป้อนสัญญาณซายน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.41 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.41 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 7 kHz ของ 2nd IIR Lowpass Filter นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

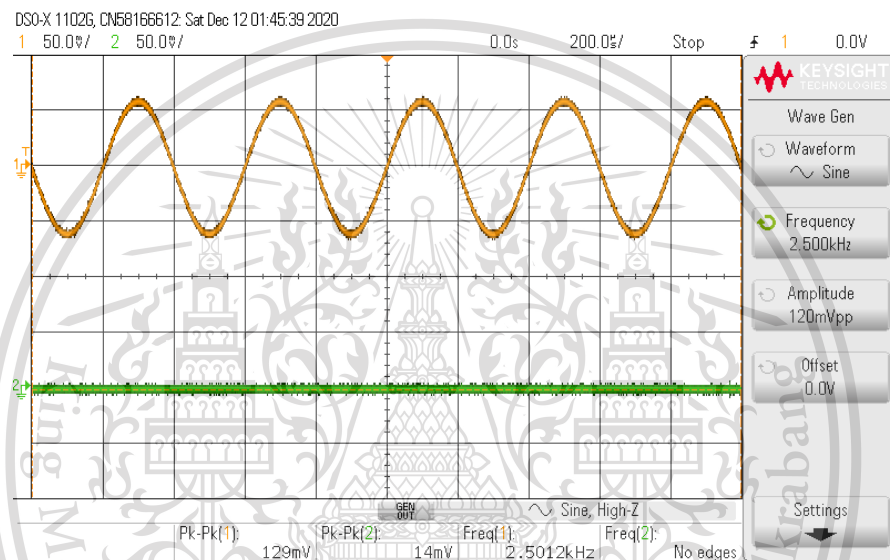
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) ผลการสร้าง 2nd IIR Highpass filter

จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.42 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



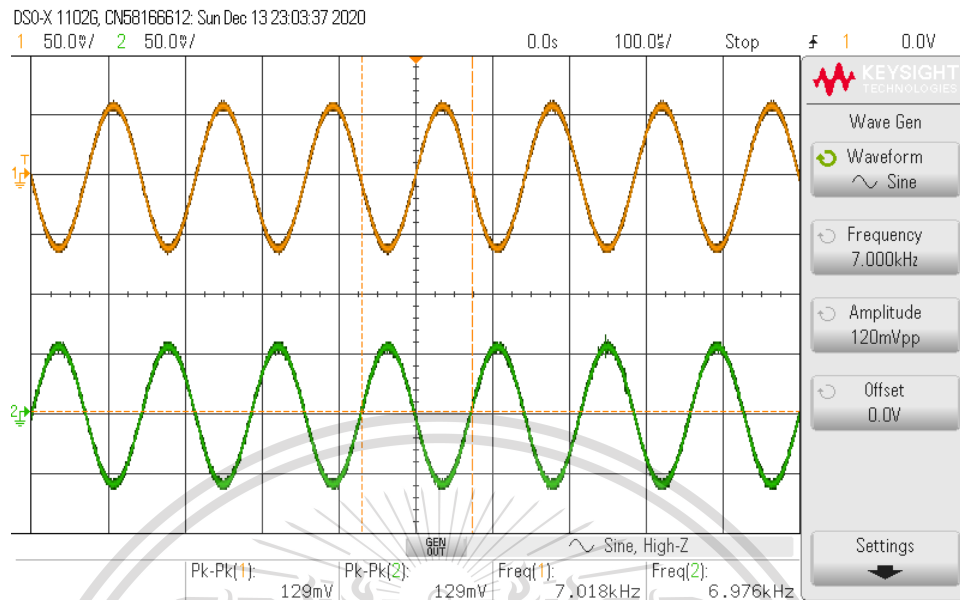
รูปที่ 4.42 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ 2nd IIR Highpass Filter

2.2) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.43 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.43 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Highpass Filter

### 3) ผลการสร้าง 2nd IIR Bandpass filter

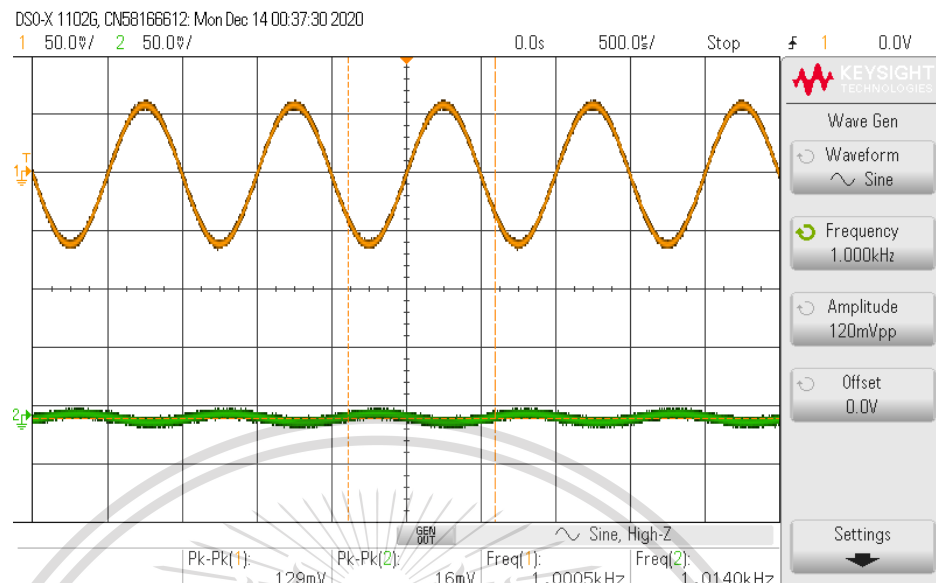
จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

3.1) ป้อนสัญญาณชายน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.44 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

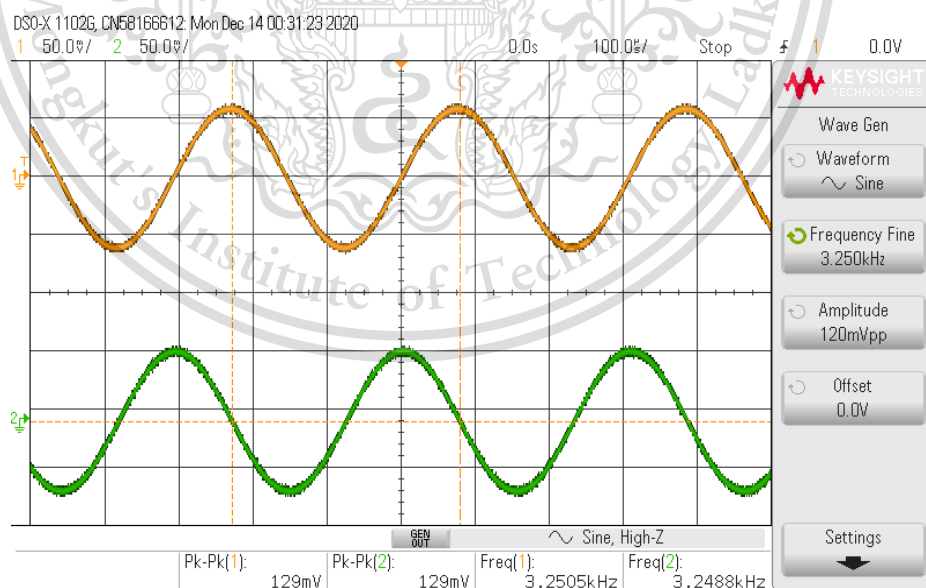
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.44 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter

3.2) ป้อนสัญญาณซายน์ความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.45 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



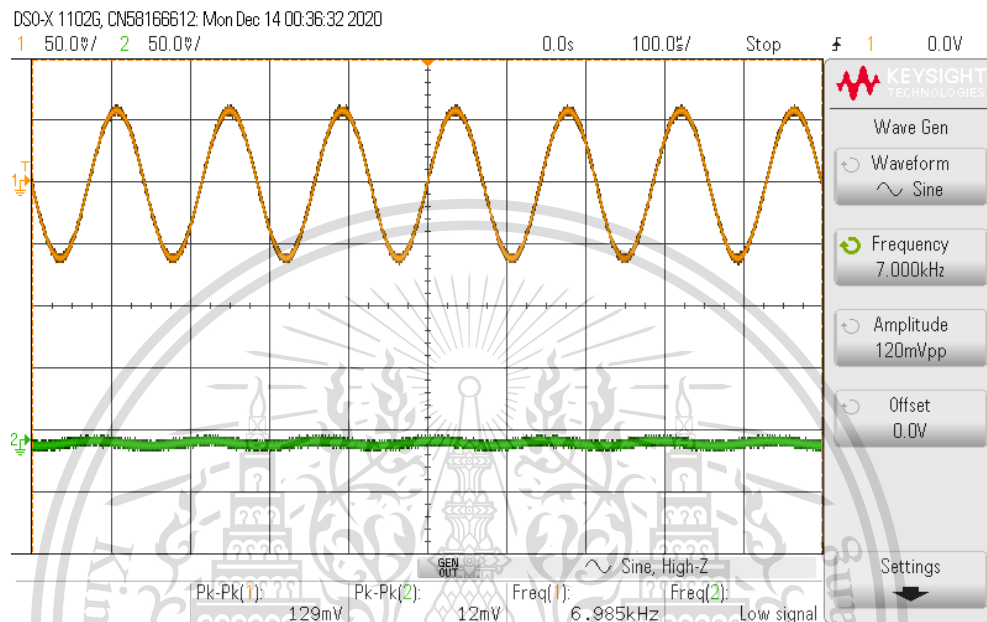
รูปที่ 4.45 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 3.25kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.46 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.46 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter

#### 4) ผลการสร้าง 2nd IIR Bandstop filter

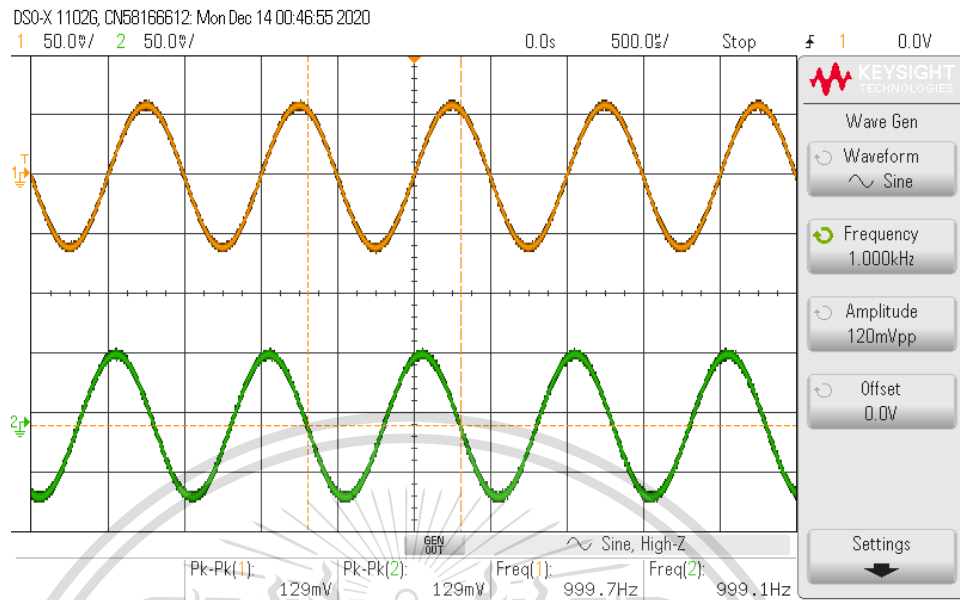
จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

4.1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.47 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

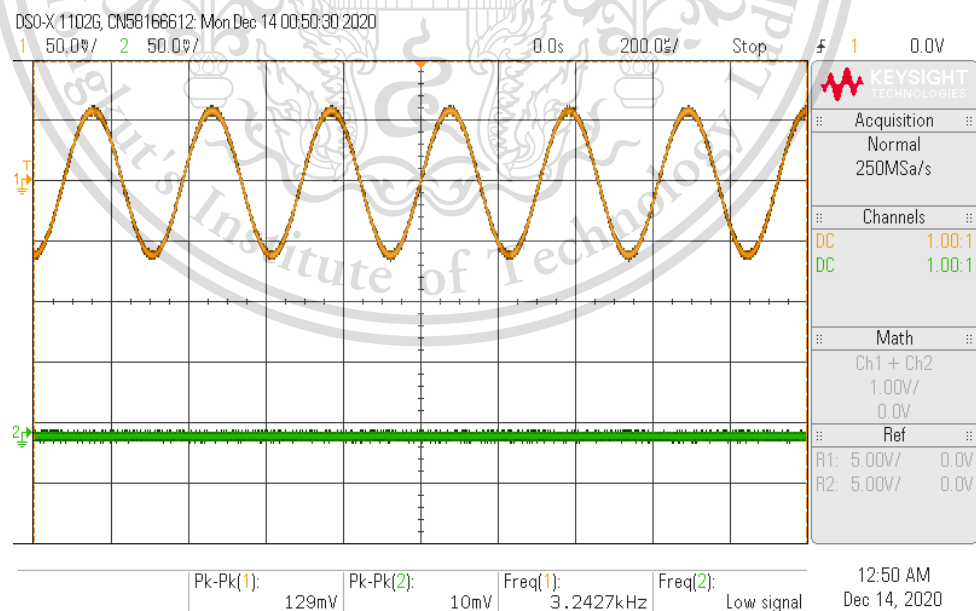
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.47 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter

4.2) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.48 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.48 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine

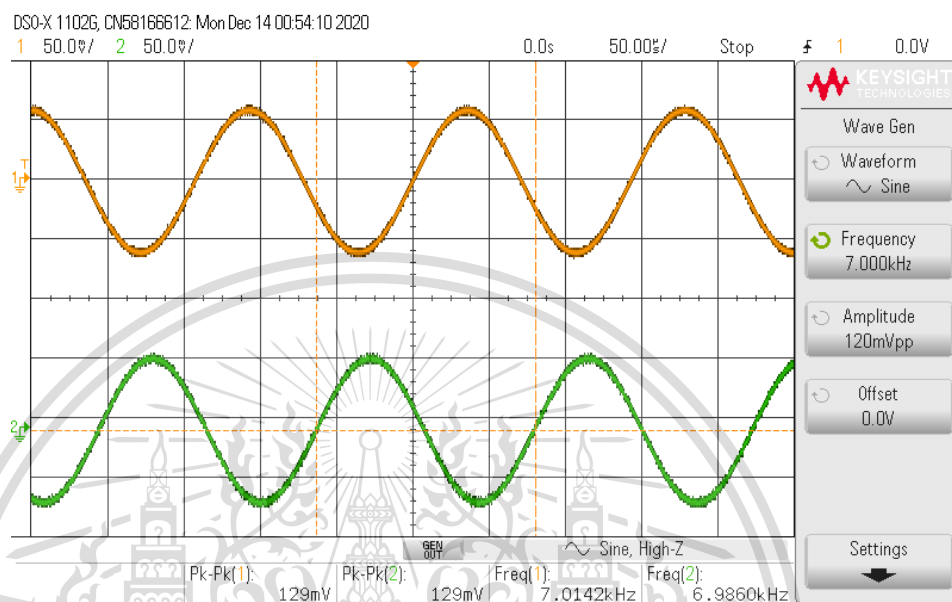
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.49 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.49 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter

## 4.6 ผลการทดสอบการสร้าง IIR filter ด้วยวิธี Butterworth

### 4.6.1 วัดผลการสร้าง IIR filter ใน frequency domain

ใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัด Frequency Response ของฟิลเตอร์รูปแบบต่างๆ ได้ผลดังนี้

#### 4.6.1.1 วัดผล IIR Lowpass filter ด้วยวิธี Butterworth แบบ

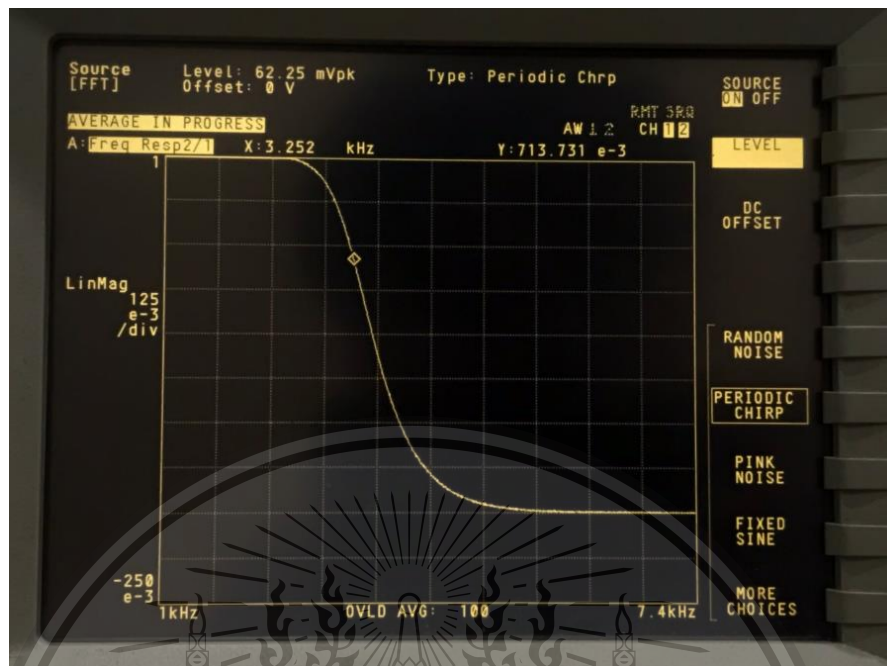
cascade

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.25 kHz มีค่าประมาณ 0.714 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.50 ผลจากการวัด Amplitude Response ของ IIR Lowpass Filter แบบ Cascade จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

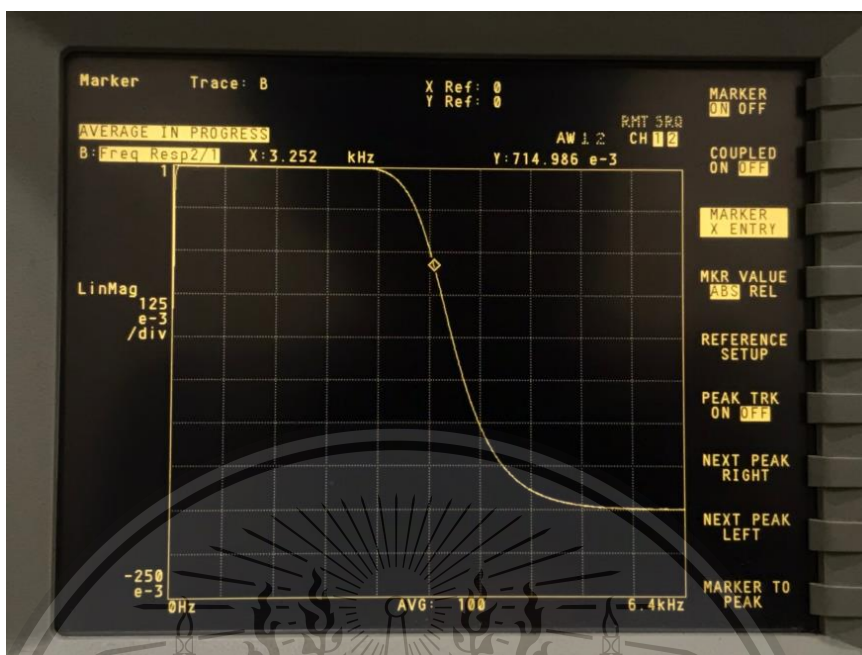
#### 4.6.1.2 วัดผล IIR Lowpass filter ด้วยวิธี Butterworth แบบ parallel

จากการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.51 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.25 kHz มีค่าประมาณ 0.715 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.51 ผลจากการวัด Amplitude Response ของ IIR Lowpass Filter แบบ Parallel จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

#### 4.6.2 วัดผลการสร้าง IIR filter ใน time domain

ใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดค่าสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับค่าสัญญาณอินพุต โดยการป้อนสัญญาณชายน้ที่คงค่าแอมพลิจูด ปรับค่าความถี่ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ เพื่อตรวจสอบว่าที่ความถี่นั้นๆฟิลเตอร์สามารถทำงานได้ตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่

4.6.2.1 วัดผล IIR Lowpass filter ด้วยวิธี Butterworth แบบ cascade

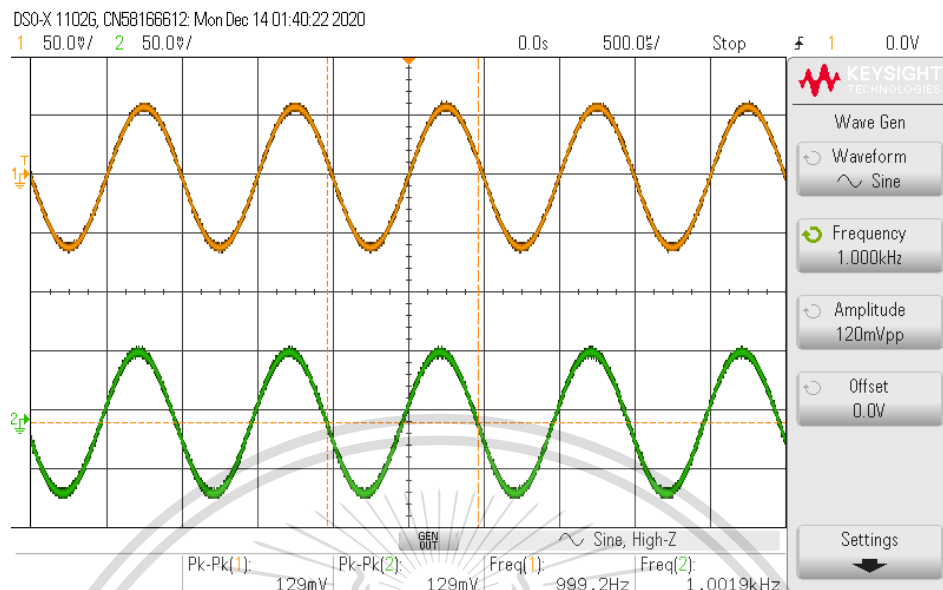
จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.52 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

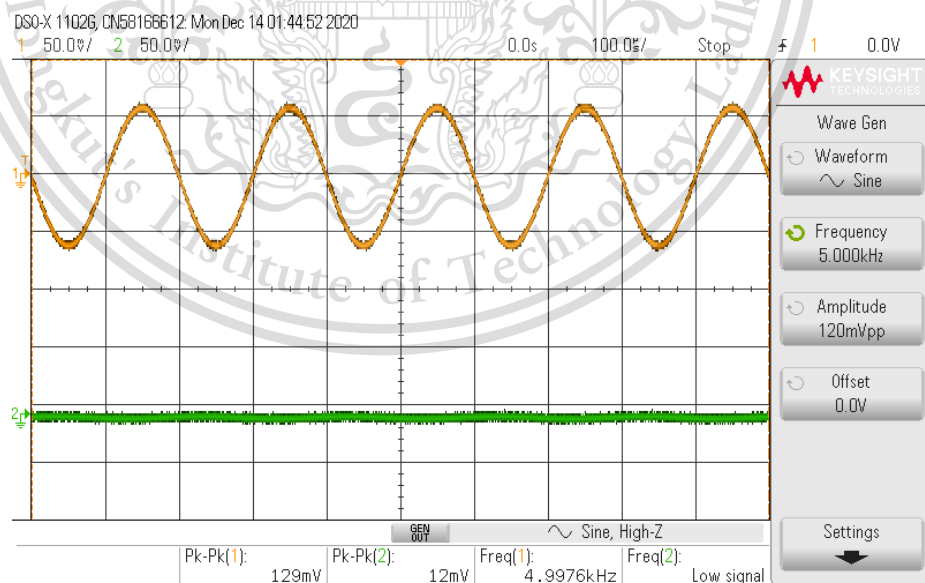
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.52 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Cascade

2) ป้อนสัญญาณขายน้ความถี่ 5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.53 โดยค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.53 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 5 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Cascade

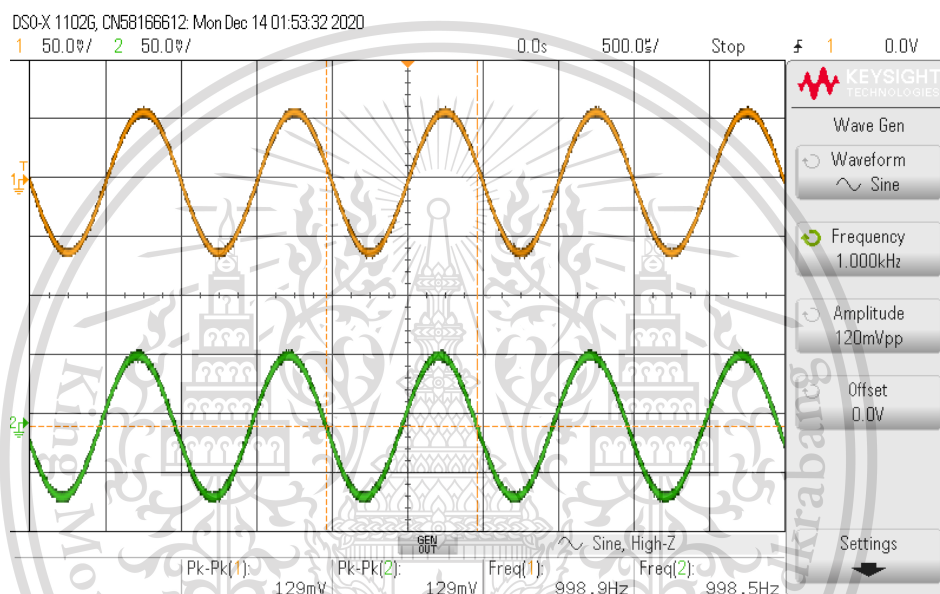
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.6.2.2 วัดผล IIR Lowpass filter ด้วยวิธี Butterworth แบบ parallel จากการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.54 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



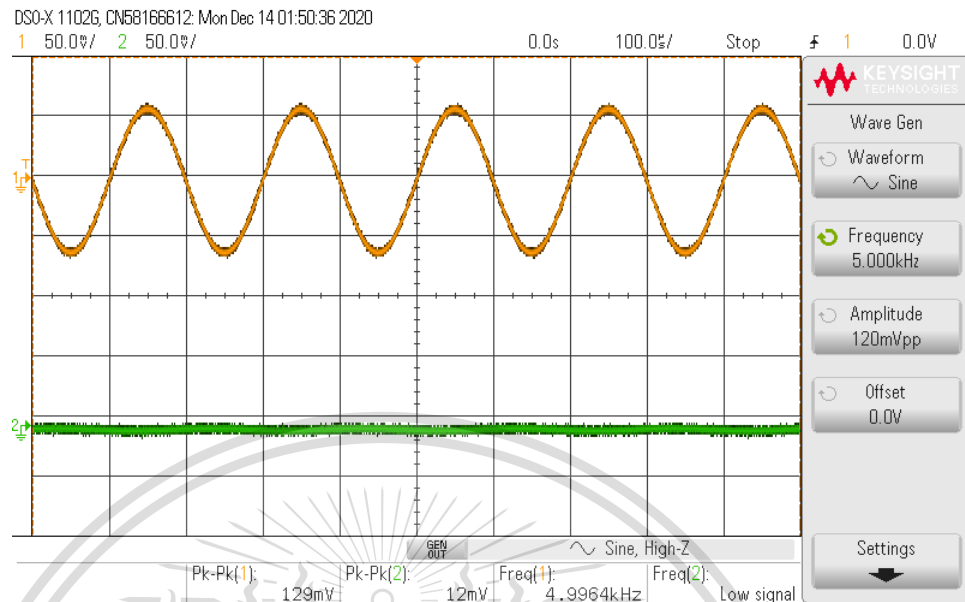
รูปที่ 4.54 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Parallel

2) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.55 โดยค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.55 วัดสัญญาณใน Time Domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 5 kHz ของ IIR Lowpass Filter แบบ Parallel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ

แพลตฟอร์มที่เลือกใช้สำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับผู้ปกครองด้านการได้ยิน โดยแบ่งการทำงานที่เป็น 2 ส่วน คือ แอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน และ แอปพลิเคชันสำหรับช่วยฟัง

#### 5.1 การออกแบบ

##### 5.1.1 การออกแบบแอปพลิเคชันสำหรับรับเสียงเข้าแล้วส่งเสียงออกในระบบเวลาจริง

แอปพลิเคชันนี้เป็นแอปพลิเคชันเบื้องต้นสำหรับการสร้างแอปพลิเคชันที่ใช้สำหรับประมวลผลในระบบเวลาจริง ส่วนสำคัญ คือ ส่วนโคเดก (codec) ของการนำสัญญาณเสียงเข้าและออก โดยคำสั่งสำคัญที่ใช้อยู่ในคลาส AudioRecord [52] และ AudioTrack [53] ในโปรแกรม Android Studio แสดงดังรูปที่ 5.1

```
183
184     int intRecordSampleRate = AudioTrack.getNativeOutputSampleRate(AudioManager.STREAM_MUSIC);
185
186     int bufferSize = AudioRecord.getMinBufferSize(intRecordSampleRate, AudioFormat.CHANNEL_IN_MONO
187         , AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT);
188
189     short audioData = new short[bufferSize];
190
191     audioRecord = new AudioRecord(MediaRecorder.AudioSource.MIC
192         , intRecordSampleRate
193         , AudioFormat.CHANNEL_IN_STEREO
194         , AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT
195         , bufferSize);
196
197     audioTrack = new AudioTrack(AudioManager.STREAM_MUSIC
198         , intRecordSampleRate
199         , AudioFormat.CHANNEL_IN_STEREO
200         , AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT
201         , bufferSize
202         , AudioTrack.MODE_STREAM);
203
204     audioTrack.setPlaybackRate(intRecordSampleRate);
205
206     audioRecord.startRecording();
207     audioTrack.play();
208
```

รูปที่ 5.1 คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับรับเสียงเข้าแล้วส่งเสียงออกในระบบเวลาจริง

คำสั่งในบรรทัดที่ 184 ถึง 189 เป็นส่วนของการคำนวณบัฟเฟอร์ที่มีขนาดเล็กหรือสั้นที่สุดที่เป็นประเภท short ซึ่งคาบขนาดของบัฟเฟอร์ที่น้อยที่สุดนี้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโทรศัพท์มือถือที่ต่างกัน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แต่ละเครื่อง การหาบัพเพอร์ที่สั้นที่สุดเพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณจะทำให้การรับส่งข้อมูลเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสมสำหรับการเข้ารหัสแบบ PCM 16 บิต [54] และเป็นไปตามการประมวลผลสัญญาณในระบบเวลาจริง

คำสั่งในส่วนการระบุวิธีการนำเข้าเสียงในระบบเวลาจริงแสดงในบรรทัดที่ 191 ถึง 195 โดยจะระบุช่องทางการรับเสียง คือ ไมโครโฟน (MIC) รูปแบบช่องสัญญาณเป็นแบบสเตอริโอ (STEREO) การเข้ารหัสใช้แบบ PCM 16 บิต ส่วนค่า Sampling Rate และ Buffer size จะเป็นการคำนวณและกำหนดโดยโทรศัพท์แต่ละเครื่อง

คำสั่งในส่วนการระบุวิธีการส่งออกเสียงในระบบเวลาจริงแสดงในบรรทัดที่ 197 ถึง 202 โดยจะระบุรูปแบบช่องสัญญาณเป็นแบบสเตอริโอ (STEREO) การเข้ารหัสใช้แบบ PCM 16 บิต ส่วนค่า Sampling Rate และ Buffer size จะเป็นการคำนวณและกำหนดโดยโทรศัพท์แต่ละเครื่อง

สุดท้ายคำสั่งในบรรทัดที่ 204 ถึง 207 จะเป็นส่วนการทำงานให้เกิดการนำเข้าและส่งออกเสียงในระบบเวลาจริง

สาเหตุที่เลือกใช้ช่องสัญญาณแบบสเตอริโอเนื่องจากปัจจุบันระบบหรือเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับเรื่องเสียงส่วนมากนิยมใช้ช่องสัญญาณแบบสเตอริโอ ส่วนการเข้ารหัสได้ทำการเลือกจากตัวเลือกระหว่างการเข้ารหัสแบบ PCM 8 บิต กับ PCM 16 บิต เนื่องจาก PCM 16 บิตสามารถเก็บข้อมูลตัวเลขได้ละเอียดกว่าจึงทำการเลือกใช้การเข้ารหัสแบบ PCM 16 บิต

### 5.1.2 การออกแบบแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน

ส่วนนี้ออกแบบโดยอ้างอิงจากวิธีวัดการทดสอบการได้ยินตามมาตรฐาน ISO 8253-1 ซึ่งกล่าวถึง การตรวจการได้ยินโดยใช้เสียงบริสุทธิ์ในอากาศ (Pure-tone air conduction audiometry) [55] โดยลำดับขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยหูข้างที่มีการได้ยินที่ดีกว่า ให้เริ่มทดสอบที่ความถี่ 1000 เฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการทดสอบที่ 2000 เฮิร์ตซ์, 4000 เฮิร์ตซ์, 8000 เฮิร์ตซ์, 125 เฮิร์ตซ์, 250 เฮิร์ตซ์ และ 500 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ และทดสอบที่ 1000 เฮิร์ตซ์ อีกครั้ง (เฉพาะหูข้างแรกที่ทำกรทดสอบ) ทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบที่ความถี่ 1000 เฮิร์ตซ์ ครั้งแรก ถ้าต่างกันไม่เกิน 5 เดซิเบล ให้เลือกใช้ค่าที่น้อยกว่า แต่ถ้าเปรียบเทียบแล้วต่างกันเกิน 5 เดซิเบล ต้องตรวจสอบว่าหูมีการได้ยินผิดปกติหรือไม่ และตัวผู้ทดสอบควรจะได้รับกรทดสอบใหม่ตั้งแต่ต้นอีกครั้ง ผลลัพธ์จะถูกบันทึกใน audiogram จากนั้นให้ทำการทดสอบหูอีกข้างด้วยวิธีเดียวกัน โดยปกติแล้วหูข้างที่สองนี้ ไม่จำเป็นต้องทดสอบซ้ำที่ 1000 เฮิร์ตซ์ แต่ถ้าหูข้างแรกที่ทำกรทดสอบมีความผิดปกติให้ทดสอบหูข้างที่สองที่ความถี่ 1000 เฮิร์ตซ์ อีกครั้ง ระยะเวลาของเวลาที่เสียงแต่ละความถี่จะถูกสร้างออกมาอยู่ที่ 1-3 วินาที และระยะเวลาที่เล่นเสียงจะอยู่ที่ 1-3 วินาทีเช่นกัน โดยที่ระยะเวลาของแต่ละความถี่กับความนานของเสียงที่เล่นต้องไม่เท่ากัน เพื่อให้ได้ผลทดสอบที่แม่นยำ นอกจากนี้ผู้ทดสอบห้ามหยุดการทดสอบระหว่างทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยการทำงานของแอปพลิเคชันในส่วนนี้จะทำหน้าที่สร้างเสียงสัญญาณไซน์ทั้งหมด 7 ความถี่ คือ 125 เฮิรตซ์, 250 เฮิรตซ์, 500 เฮิรตซ์, 1000 เฮิรตซ์, 2000 เฮิรตซ์, 4000 เฮิรตซ์ และ 8000 เฮิรตซ์ โดยจะตั้งค่าระดับเสียงเริ่มต้นที่ 40 เดซิเบล เมื่อผู้ทดสอบทำการทดสอบการได้ยินครบทุกความถี่แล้ว ค่าระดับเสียงแต่ละความถี่ที่ปรับได้จะถูกบันทึกเป็น audiogram แล้วค่าระดับเสียงทั้ง 7 ค่านี้จะถูกนำไปใช้ต่อในแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง

วิธีการหาค่า threshold ขณะทำการทดสอบซึ่งจะเริ่มทำตั้งแต่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์, 2000 เฮิรตซ์, 4000 เฮิรตซ์, 8000 เฮิรตซ์, 125 เฮิรตซ์, 250 เฮิรตซ์, 500 เฮิรตซ์ แล้วกลับมาทดสอบซ้ำที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ อีกหนึ่งรอบ โดยแต่ละความถี่จะมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) ลดเสียงลงมาถึง 10 เดซิเบล จนกระทั่งไม่ได้ยินเสียง โดยระดับเสียงเริ่มต้นของสัญญาณที่แอปพลิเคชันนี้สร้างคือ 40 เดซิเบล
- 2) เพิ่มระดับเสียงขึ้นทีละ 5 เดซิเบล จนกระทั่งได้ยินเสียง
- 3) ทำขั้นตอนที่ 1 และ 2 ซ้ำอีกครั้ง
- 4) ทำขั้นตอนที่ 3 ไปจนได้ผลตอบสนองที่ตรงกัน 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะได้ค่า threshold ของการได้ยิน แล้วเปลี่ยนค่าความถี่ตามลำดับที่กล่าวมาข้างต้น

การทำงานของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินเบื้องต้นคือการสร้างเสียงสัญญาณไซน์ ปริมาณนี้พอร์นได้ทำการนำเข้าคลาสคำสั่งที่มีผู้พัฒนาไว้ โดยผู้ที่พัฒนาไว้แล้วได้ทำการสร้างแอปพลิเคชันที่ส่งเคราะห์เสียงโน้ตดนตรีออกมา [56] ซึ่งเสียงโน้ตดนตรีต่างๆเกิดจากสัญญาณไซน์หลายความถี่หรือความถี่ฮาร์โมนิกหลายฮาร์โมนิกผู้จัดทำปริมาณนี้จึงนำส่วนที่ใช้ในการส่งเคราะห์สัญญาณไซน์มาใช้สำหรับสร้างเสียงสัญญาณไซน์ความถี่ต่างๆ ในโปรแกรม Android Studio โดยคำสั่งที่ใช้เลือกให้สร้างรูปแบบสัญญาณเป็นสัญญาณไซน์แสดงดังรูปที่ 5.2

```

145
146 toneGenerator.mSelectSineSaw.select.set(0);
147 toneGenerator.mSelectFinalSource.select.set(0);
148 toneGenerator.mSineOsc.setEnabled(true);
149 toneGenerator.mSawOscBL.setEnabled(false);
150 toneGenerator.mSquareOscBL.setEnabled(false);
151 toneGenerator.mWhiteNoise.setEnabled(false);
152 sourceFlag = 0;
153

```

รูปที่ 5.2 คำสั่งเลือกรูปแบบสัญญาณที่ถูกสร้างให้เป็นสัญญาณไซน์

ต่อไปเป็นส่วนการระบุให้แอปพลิเคชันทำการสร้างเสียงสัญญาณไซน์ความถี่ต่างๆ ตามที่กำหนด โดยกำหนดให้สร้างเสียงสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 125 เฮิรตซ์, 250 เฮิรตซ์, 500 เฮิรตซ์, 1000 เฮิรตซ์, 2000 เฮิรตซ์, 4000 เฮิรตซ์ และ 8000 เฮิรตซ์ ตามลำดับ แสดงคำสั่งดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

254
255 final RadioGroup radioGroup = findViewById(R.id.selected);
256 radioGroup.setOnCheckedChangeListener((group, checkedId) -> {
257     switch (checkedId) {
258     case R.id.radioButton125:
259         freqData = (125.00f);
260         calibFact = 0.156675107;
261         position = P125;
262         break;
263     case R.id.radioButton250:
264         freqData = (250.00f);
265         calibFact = 0.3715352291;
266         position = P250;
267         break;
268     case R.id.radioButton500:
269         freqData = (500.00f);
270         calibFact = 0.6918309709;
271         position = P500;
272         break;
273     case R.id.radioButton1k:
274         freqData = (1000.00f);
275         calibFact = 1.0;
276         position = P1K;
277         break;
278     case R.id.radioButton2k:
279         freqData = (2000.00f);
280         calibFact = 1.148153621;
281         position = P2K;
282         break;
283     case R.id.radioButton4k:
284         freqData = (4000.00f);
285         calibFact = 1.122018454;
286         position = P4K;
287         break;
288     case R.id.radioButton8k:
289         freqData = (8000.00f);
290         calibFact = 0.881048373;
291         position = P8K;
292         break;
293     }
294     toneGenerator.frequency.set(freqData);
295     textView.setText(valueOf(gainList.get(position)));
296     textView.append(" dBHL");
297 });
298
300

```

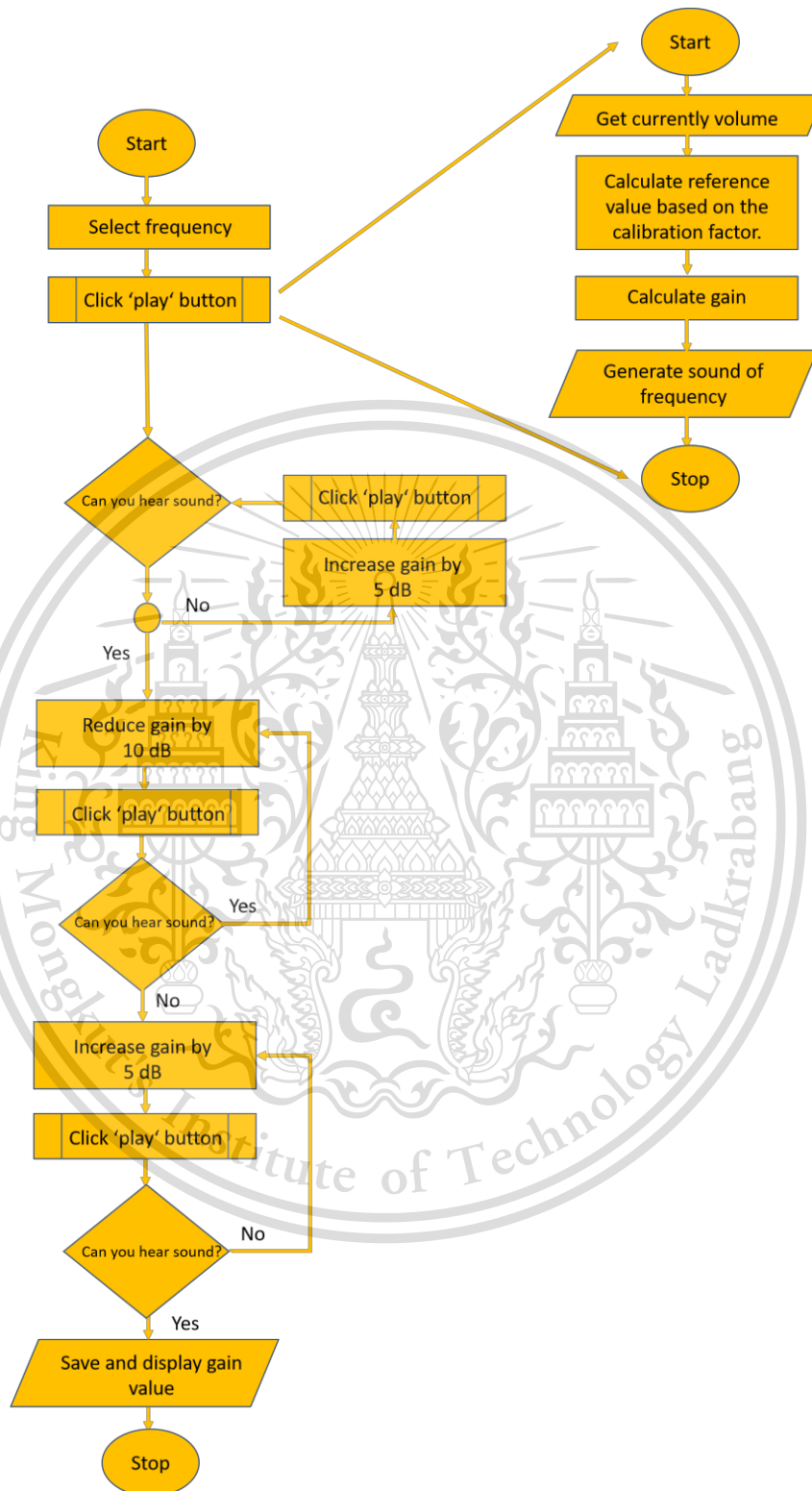
รูปที่ 5.3 คำสั่งสร้างเสียงสัญญาณไซน์ทั้ง 7 ความถี่

ส่วนเกณฑ์หรือระดับสัญญาณเริ่มต้นของแต่ละความถี่ที่แสดงบนหน้าต่างแอปพลิเคชันให้เริ่มต้นค่าที่ 40 เดซิเบล แล้วสร้างฟังก์ชันการทำงานให้มีการเพิ่มหรือลดค่าระดับสัญญาณโดยใช้ปุ่มเพิ่มและลดค่าระดับสัญญาณ ตั้งค่าให้เพิ่มทีละ 5 เดซิเบล และ ลดทีละ 10 เดซิเบล อ้างอิงวิธีทดสอบตามมาตรฐาน [57] การทำงานโดยรวมของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินแสดงดังผังงาน flowchart รูปที่ 5.4 การทดสอบการได้ยินที่กล่าวไว้ข้างต้น มีตัวเลือกค่าความถี่ที่ต้องการทดสอบมีปุ่มสำหรับกดเล่นเสียงสัญญาณ รวมทั้งส่วนของการปรับค่าระดับสัญญาณเสียงซึ่งอ้างอิงจากการคำนวณสมการที่ 5.1 ที่สัมพันธ์กับค่า correction factor ในตารางที่ 5.1 ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 5.2 สัญญาณที่สร้างออกมาจะดังเป็นระยะเวลา 3 วินาที โดยหน้าต่างแอปพลิเคชันที่ได้ทำการออกแบบตามฟังก์ชันการทำงานข้างต้นรวมทั้งสมการที่ใช้คำนวณจะได้อ้างอิงจากเอกสารของแอปพลิเคชัน Tester Stuchu [58] หรือ แปลเป็นภาษาอังกฤษคือ Hearing Tester แอปพลิเคชันที่พัฒนาโดยผู้พัฒนาชาวโปแลนด์ หน้าต่างแอปพลิเคชันที่เราทำการพัฒนาแสดงดังรูปที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.4 ผังงาน flowchart แสดงการทำงานโดยรวมของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$L_x = 10 \log \left( \frac{\text{gain}}{\text{ref}} \right)^2 \quad (5.1)[58]$$

โดย  $L_x$  คือ ระดับของค่าเกินในมาตราส่วนลอการิทึม หน่วย เดซิเบล

$\text{gain}$  คือ ค่าเกินใน linear scale โดยค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

$\text{ref}$  คือ ค่า reference value ที่หาได้โดยอ้างอิงจาก calibration factor ของแต่ละความถี่โดยค่าจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

$$W_A = 10 \log \left[ \frac{1.562339 f^4}{(f^2 + 107.65265^2)(f^2 + 737.86223^2)} \right] + 10 \log \left[ \frac{2.232881 \cdot 10^{16} f^4}{(f^2 + 20.598997^2)^2 (f^2 + 12194.22^2)^2} \right] \quad (5.2)[58]$$

โดย  $W_A$  คือ ค่า weight ที่นำมาใช้หรือค่า correction factor หน่วย เดซิเบล

$f$  คือ ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์

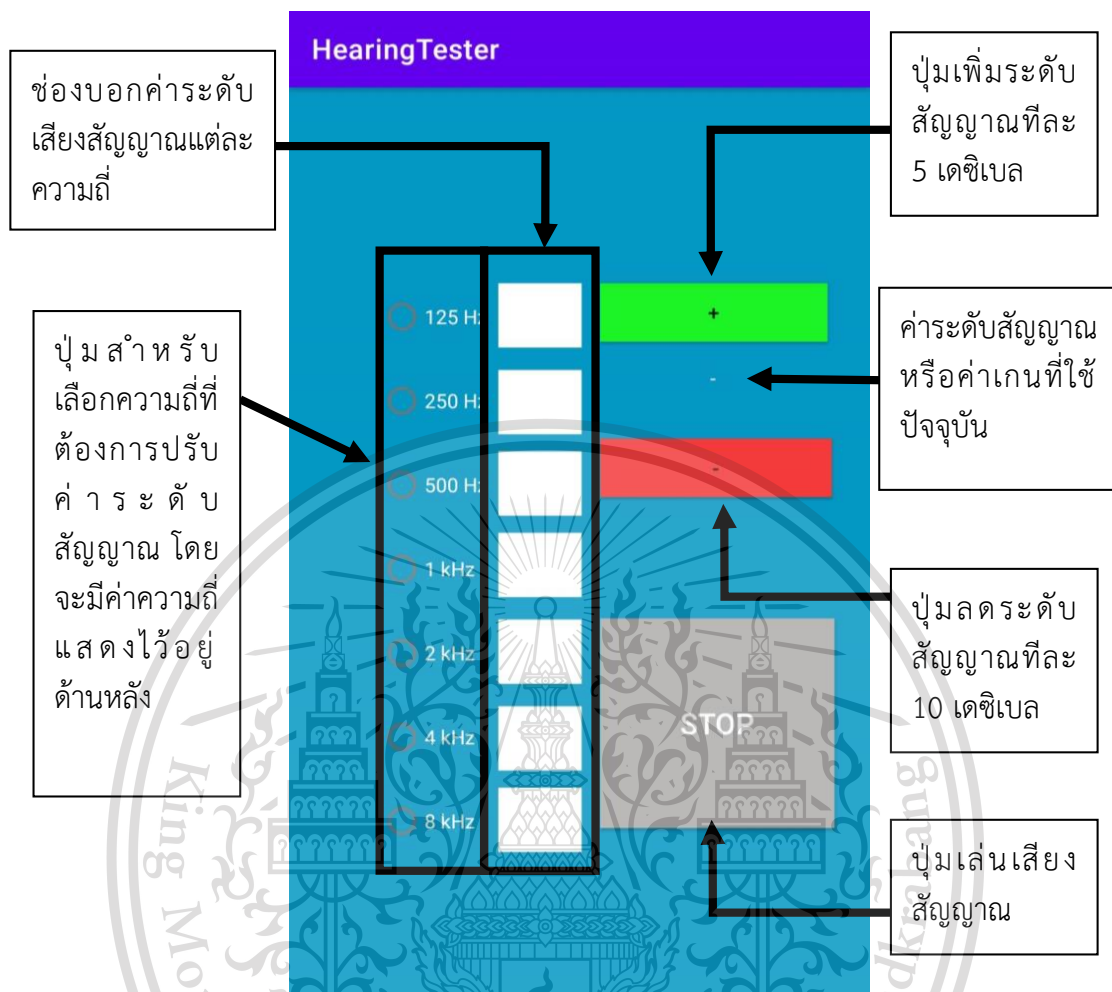
ตารางที่ 5.1 แสดงค่า correction values ที่คำนวณได้จากความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ [58] ผลลัพธ์จากสมการที่ 5.2

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่า correction factor (เดซิเบล)
125	-16.1
250	-8.6
500	-3.2
1000	0.0
2000	1.2
4000	1.0
8000	-1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



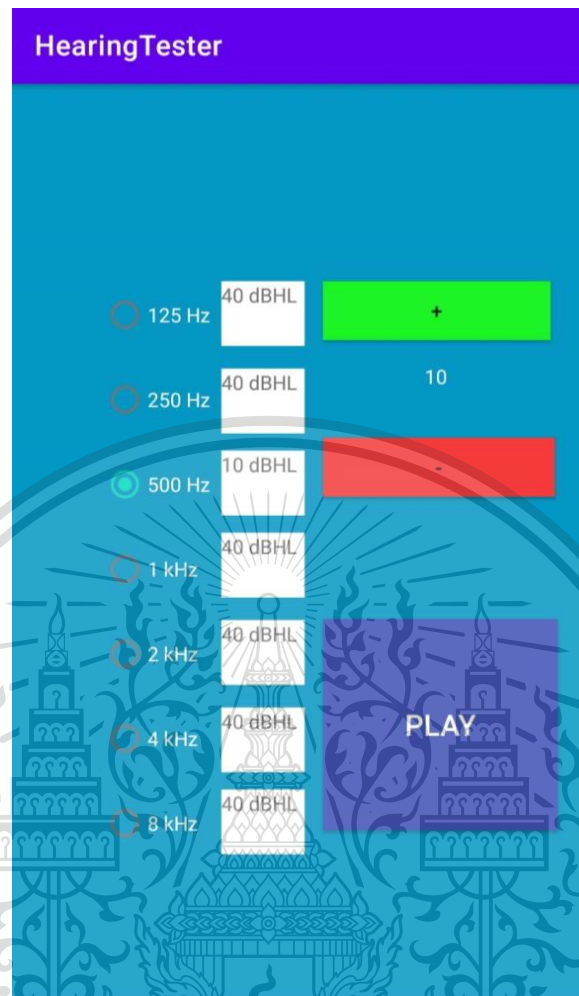
รูปที่ 5.5 หน้าต่างการทำงานแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน

เมื่อทำการเลือกความถี่ที่ทำการทดสอบบนแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน ค่าระดับสัญญาณจะเริ่มต้นที่ 40 เดซิเบล แล้วเมื่อทำการกดปุ่ม stop ด้านล่างปุ่มลดระดับเสียง ข้อความบนปุ่มจะเปลี่ยนเป็น play และทำให้เสียงสัญญาณที่ความถี่นั้นดังเป็นระยะเวลา 3 วินาที แสดงดังรูปที่ 5.6 เป็นตัวอย่างการเลือกความถี่สัญญาณที่ 500 เฮิรตซ์ ทดสอบและวัดค่าระดับเสียงสัญญาณได้ 10 เดซิเบล โดยเมื่อทำการทดสอบครบทุกความถี่แล้วค่าระดับสัญญาณที่ทำการทดสอบจะถูกบันทึกไว้ในกล่องข้อความด้านหลังความถี่นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการทำงานเบื้องต้นของหน้าต่างแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน ที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ ระดับเสียง 10 เดซิเบล

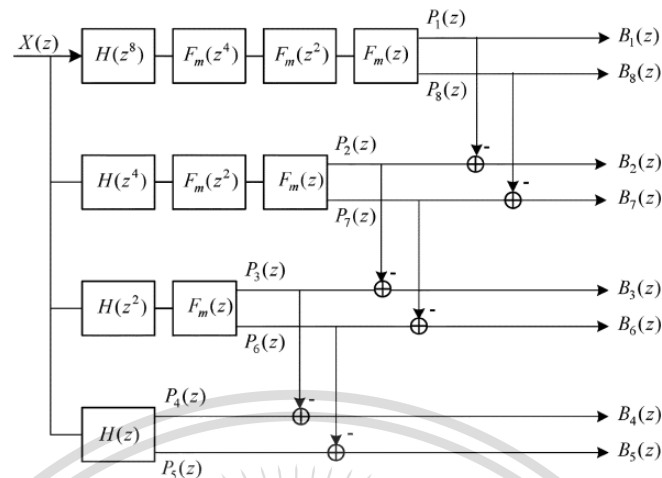
### 5.1.3 การออกแบบแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง

การออกแบบวงจรกรองความถี่เพื่อพัฒนาเป็นเครื่องช่วยฟังใช้ทฤษฎีการออกแบบ nonuniform FIR digital filter bank [59] แทนการใช้ uniform FIR digital filter เนื่องจาก uniform FIR digital filter ทำการเลียนแบบ audiogram ได้ยาก และการทำเครื่องช่วยฟัง จำเป็นต้องใช้วงจรกรองความถี่มากกว่า 1 วงจรพร้อมกัน หากทั้งหมดทำงานหรือทำการติดตั้งใน ฮาร์ดแวร์ในเวลาเดียวกันจะทำให้เกิดการคำนวณที่มากและซับซ้อนเกินไป อาจทำให้สิ้นเปลือง ทรัพยากรและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดแวร์นั้นๆ ทฤษฎีการออกแบบ nonuniform FIR digital filter bank จึงถูกเสนอเพื่อใช้ในการทดแทนข้อเสียของ uniform FIR digital filter โดยโครงสร้างของวิธีการดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.7 โครงสร้างของ nonuniform FIR Digital Filter Bank [59]

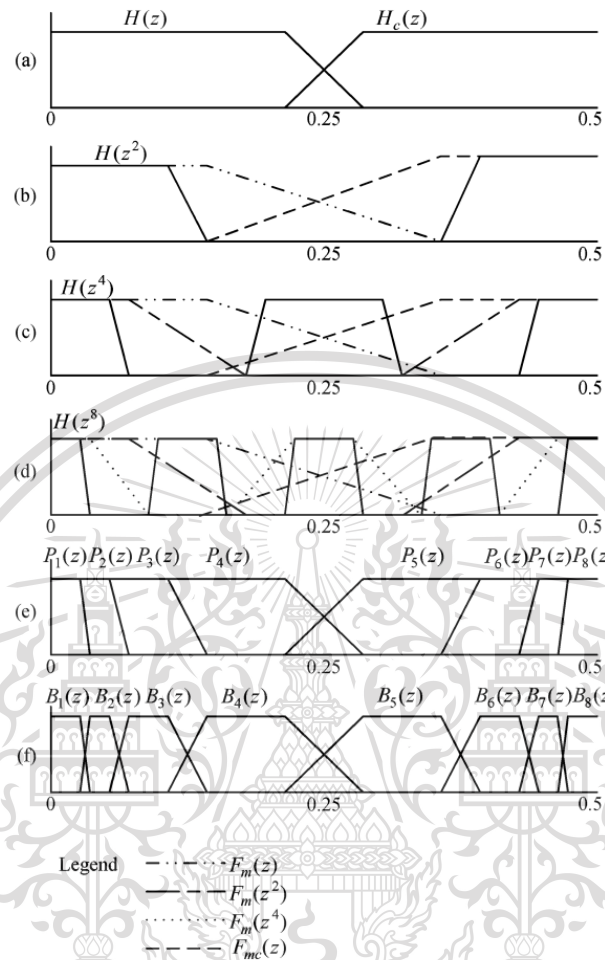
โดย nonuniform FIR digital filter bank ถูกสร้างโดย frequency-response masking technique เพื่อให้สามารถเลียนแบบ audiogram ทั้งที่ความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ดีขึ้น ซึ่งการสร้าง nonuniform filter bank ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่านจะใช้วงจรกรองความถี่พื้นฐานแบบ half-band filter 2 วงจร เป็นวงจรต้นแบบ คือ  $H(z)$  และ  $F_m(z)$  โดย  $F_m(z)$  จะถูกเรียกว่า masking filter

แถบความถี่ย่อยต่างๆที่เกิดขึ้นจะถูกสร้างจากการทำให้สมดุกลกัน (symmetry) ที่จุดกึ่งกลางความถี่ (mid frequency point) จากโครงสร้างข้างต้นวงจรต้นแบบทั้งสอง จะถูกนำไปสร้าง complementary filter และถูก interpolated ให้เกิดวงจรแถบความถี่ย่อยต่างๆ แล้วนำแถบความถี่ย่อยทั้งหมดมา interpolation จะได้ nonuniform filter bank ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่านออกมา แสดงดังรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของส่วนประกอบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง nonuniform filter bank ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่าน [59]

การสร้าง complementary filter จะเห็นได้จากรูปที่ 5.7 และ 5.9 ว่าเอาต์พุตที่ออกมาจากวงจรทางด้านขวาสุดมี 2 เอาต์พุต ซึ่งจากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าเอาต์พุต  $P_1(z)$  คู่กับ  $P_8(z)$ , เอาต์พุต  $P_2(z)$  คู่กับ  $P_7(z)$ , เอาต์พุต  $P_3(z)$  คู่กับ  $P_6(z)$  และเอาต์พุต  $P_4(z)$  คู่กับ  $P_5(z)$  เรียกเอาต์พุตที่ออกมาเป็นคู่เหล่านี้ว่า complementary output pairs และจากรูปที่ 5.8  $F_{mc}(z)$  คือ complementary filter ของ  $F_m(z)$  ซึ่งสร้างได้จากสมการที่ 5.3

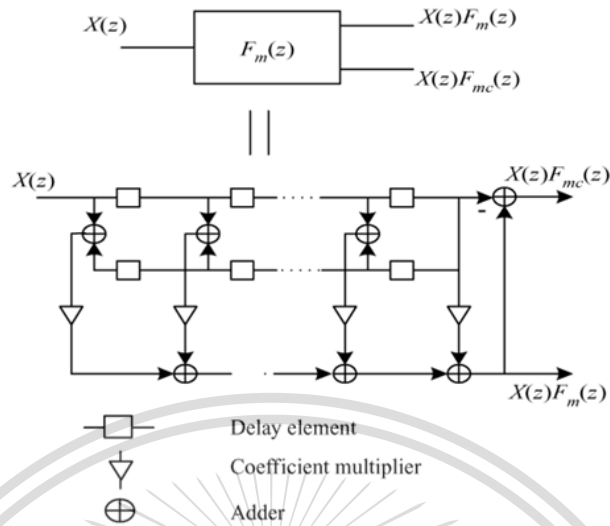
$$F_{mc}(z) = z^{-\frac{(N_F-1)}{2}} - F_m(z) \tag{5.3}[59]$$

เมื่อ  $N_F$  คือ filter length ของ  $F_{mc}(z)$  โดย hardware cost สำหรับการสร้าง complementary output จะลดลงเนื่องจากตัว delay ที่ต้องใช้ลดลงจากเดิม คือ  $\left(z^{-\frac{N_F-1}{2}}\right)$  ด้านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.9 คู่ของ complementary filter ที่ใช้ unit delay ร่วมกัน [59]

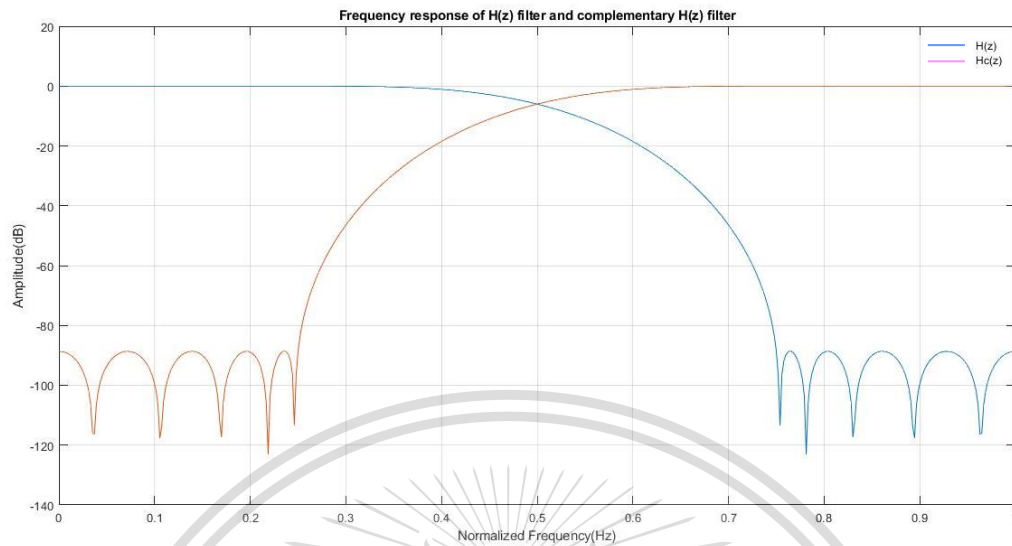
จากรูปที่ 5.8(a) ผลตอบสนองทางความถี่ที่ปรากฏ คือ  $H(z)$  และ  $H_c(z)$  ซึ่งเป็นเอาต์พุต  $P_4(z)$  และ  $P_5(z)$  ในโครงสร้างรูปที่ 5.7 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการ interpolation  $H(z)$  และ  $F_m(z)$  การทำ interpolation จะทำให้แถบความถี่ผ่านแคบลงแต่มี imaginary band เพิ่มขึ้น ตัว masking filter ทั้ง  $F_m(z)$  และ  $F_m(z)$  ที่ถูก interpolation จะทำหน้าที่ตัดแถบความถี่ผ่านที่ความถี่สูงออก เอาต์พุตทั้งหมดที่ได้ คือ  $P_1(z)$  ถึง  $P_8(z)$  หลังจากนั้น เอาต์พุตเหล่านี้ จะถูก interpolation ให้ห้กล้างส่วนที่เหมือนกันหรือซ้อนกันในแต่ละแถบความถี่ออกจะทำให้ได้ nonuniform filter bank ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่าน ออกมาแสดงผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 5.8(f)

ผลการทำ simulation ตามโครงสร้างและผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 และ 5.14

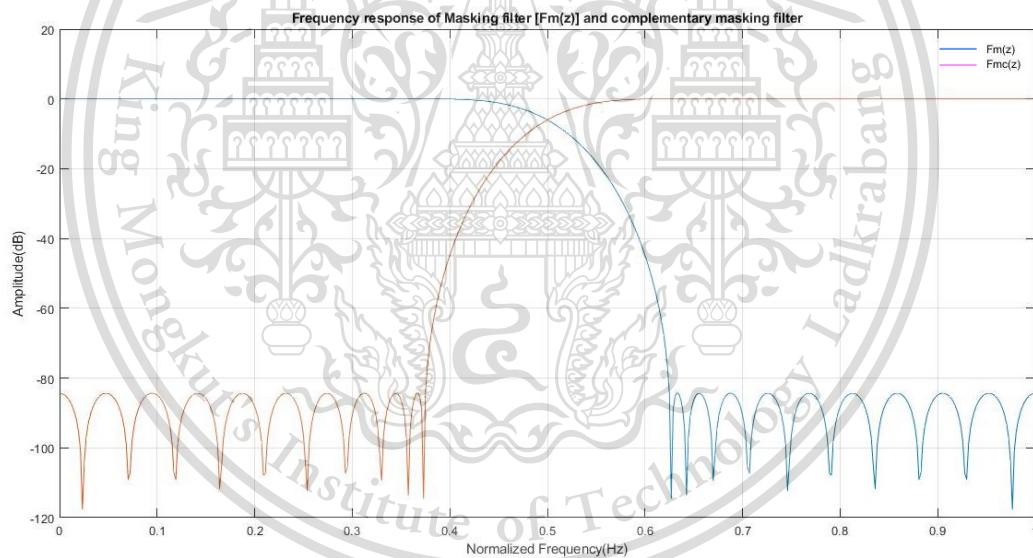
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.10 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ  $H(z)$  และ  $H_c(z)$

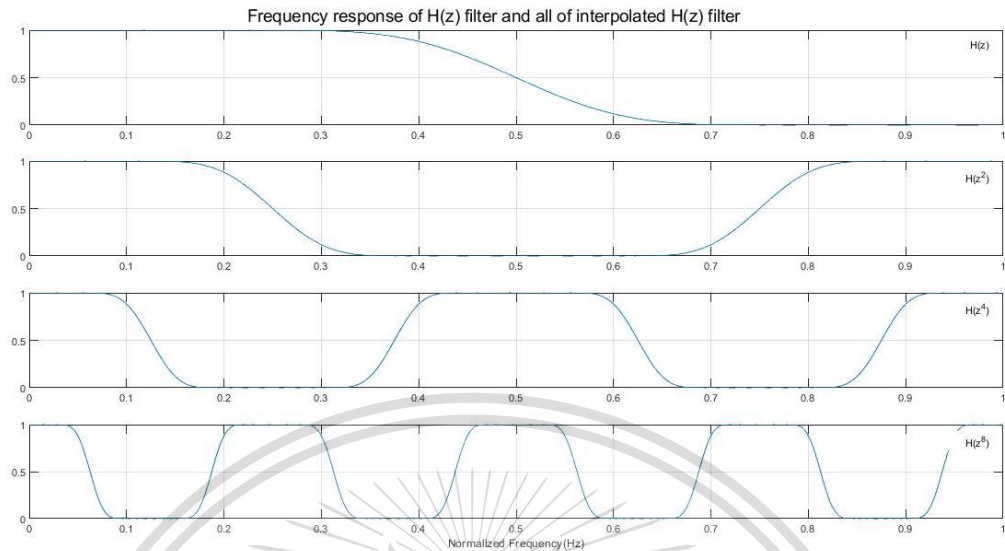


รูปที่ 5.11 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ  $F_m(z)$  และ  $F_{mc}(z)$

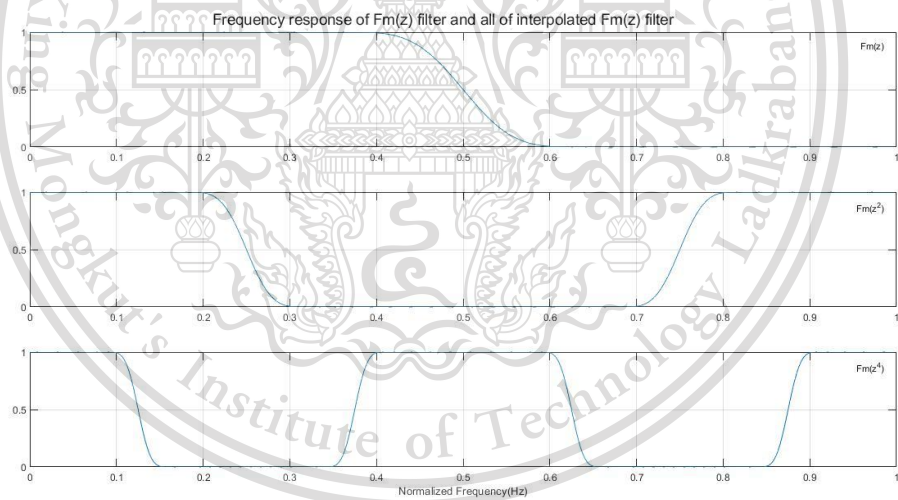
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.12 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ  
 $H(z)$ ,  $H(z^2)$ ,  $H(z^4)$  และ  $H(z^8)$

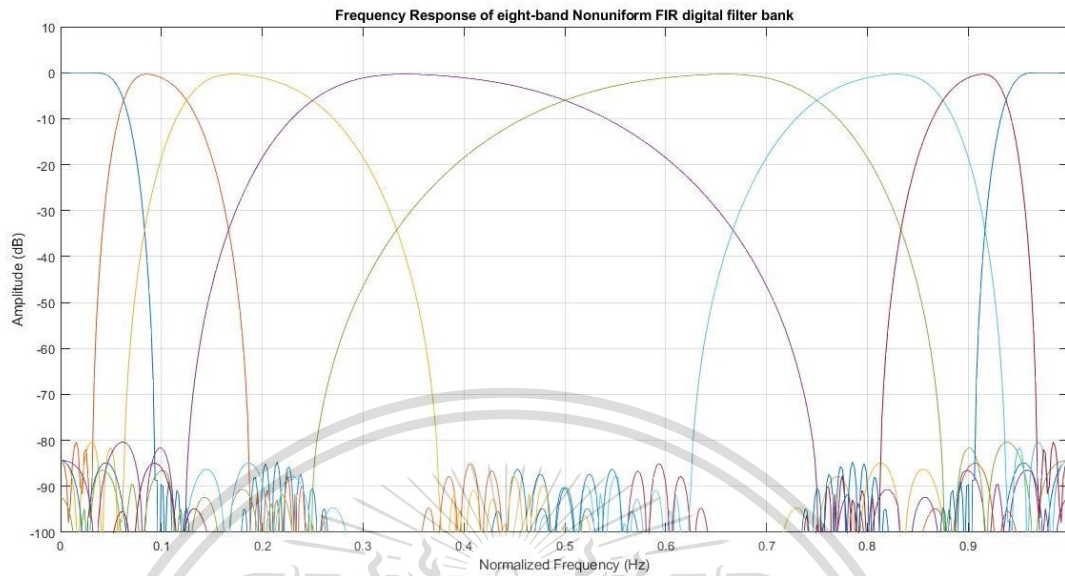


รูปที่ 5.13 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ  
 $F_m(z)$ ,  $F_m(z^2)$  และ  $F_m(z^4)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.14 ผล simulation ผลตอบสนองทางความถี่ของ nonuniform filter bank  
ทั้ง 8 ช่วงความถี่ผ่าน

โดยการใช้งานวงจรกรองความถี่ทั้ง 8 ช่วงความถี่สำหรับแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง คือ การนำค่าระดับเสียงสัญญาณที่วัดได้จากแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินมาทำการปรับค่าแอมพลิจูดของวงจรกรองความถี่ทั้ง 8 ช่วง เพื่อทำการชดเชยค่า hearing loss แต่การนำค่าระดับเสียงสัญญาณที่วัดผลได้จากแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินมาใช้กับวงจรกรองความถี่เหล่านี้จำเป็นต้องนำค่าที่ได้มาทำการ interpolate จาก 7 ค่าเป็น 8 ค่า เนื่องจากค่าที่วัดได้จากแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน มีเพียง 7 ค่าที่ตำแหน่ง 7 ความถี่ คือ 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 และ 8000 เฮิร์ตซ์ แต่จากวงจรกรองความถี่ nonuniform ทั้ง 8 ช่วงความถี่นี้ จุดสูงสุดของแอมพลิจูดของแต่ละช่วงความถี่นั้นไม่ตรงตามค่าความถี่ที่ใช้ในการทดสอบการได้ยิน การปรับค่าแอมพลิจูดของแต่ละแถบความถี่จำเป็นต้องปรับที่ตำแหน่งความถี่ที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด หากดูจากรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าคือค่า 0 เดซิเบล ซึ่งจากการทำ simulation จะปรากฏตำแหน่งทั้ง 8 ที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด คือ 0.025, 0.08, 0.17, 0.34, 0.67, 0.82, 0.92 และ 0.98 แต่จากรูปที่ 5.14 ความถี่ต่าง ๆ นั้นเป็นค่า Normalized frequency ดังนั้นหากจะนำไปใช้จะนำค่าดังกล่าวไปคูณด้วยค่า

ครึ่งหนึ่งของ sampling frequency หรือ  $f_s/2$  ซึ่งในปฏิญญาฉบับนี้ใช้ sampling frequency 16000 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นค่าที่ใช้ในการคูณ คือ 8000 จะได้ตำแหน่งความถี่ที่ใช้ในการปรับแอมพลิจูด คือ 200, 640, 1360, 2720, 5360, 6560, 7360 และ 7840 เฮิร์ตซ์ตามลำดับ โดยการนำค่า

ความถี่ 200, 640, 1360, 2720, 5360, 6560, 7360 และ 7840 เฮิร์ตซ์ โดยแต่ละตำแหน่งความถี่การค่า

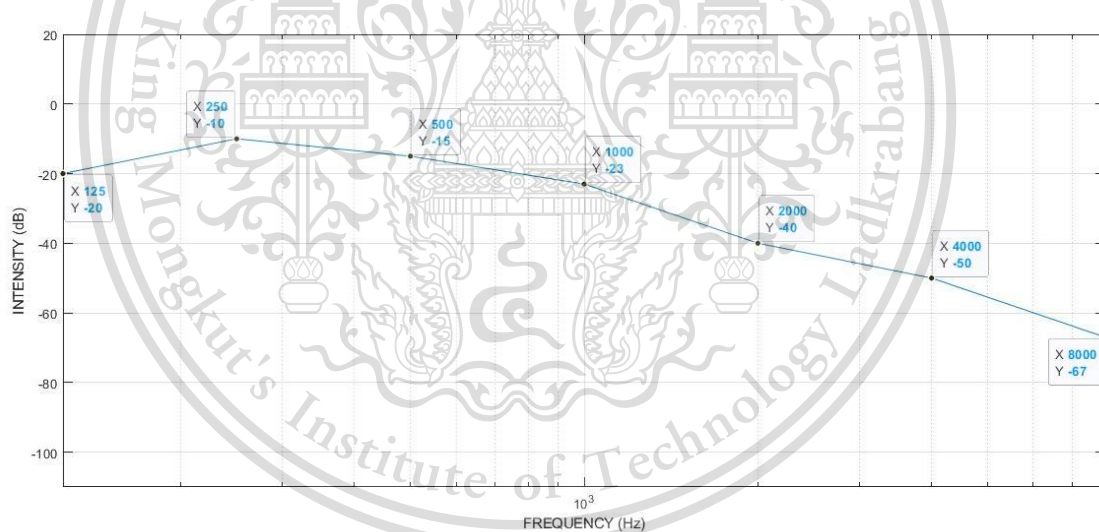
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะอยู่ระหว่างช่วงของค่าความถี่ 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 และ 8000 เฮิรตซ์ ที่มีค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จากแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินแล้ว การ interpolation ที่ง่ายที่สุดคือการลากเส้นตรงระหว่างตำแหน่งความถี่ทั้ง 7 ค่าแล้วทำการคำนวณโดยใช้วิธีหาตำแหน่งจุดบนเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด จะทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดที่ต้องใช้ในการปรับวงจรรองความถี่ทั้ง 8 ช่วงออกมา

นอกเหนือจากเหตุผลที่กล่าวไว้ก่อนหน้าถึงสาเหตุที่ปริยฐานิพนธ์นี้นำเสนอวิธี nonuniform FIR digital filter bank ในการออกแบบวงจรความถี่ผ่านสำหรับแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟังเพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดในกรณีใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธี uniform FIR digital filter นั้น มีสาเหตุอีกประการหนึ่งคือวิธีนี้สามารถ matching กับ ผลที่ได้จากการกลับ audiogram ได้ดีพอสมควร ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ในระดับหนึ่งว่าวิธีนี้สามารถใช้ในการชดเชยค่า hearing loss ได้อย่างเหมาะสม โดยจะแสดงได้ดังรูปด้านล่าง เมื่อทำการจำลอง audiogram ดังแสดงในรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการ matching มีความคล้ายคลึงกับกราฟที่ได้จากการกลับ audiogram ดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยเส้นกราฟสีแดงคือกราฟที่เกิดจากการกลับ audiogram ในรูปที่ 5.15 ส่วนกราฟสีน้ำเงินคือ matching filter ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี nonuniform FIR digital filter bank

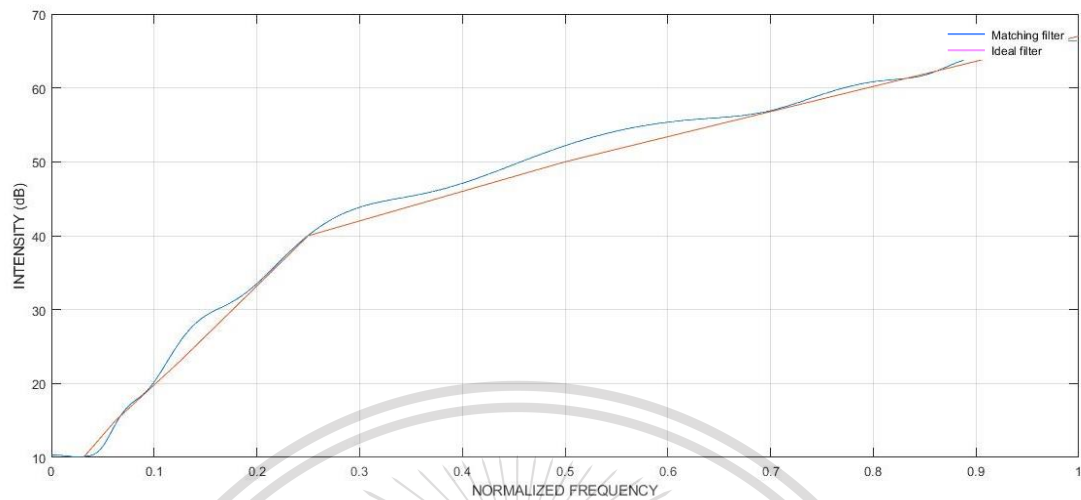


รูปที่ 5.15 audiogram จำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



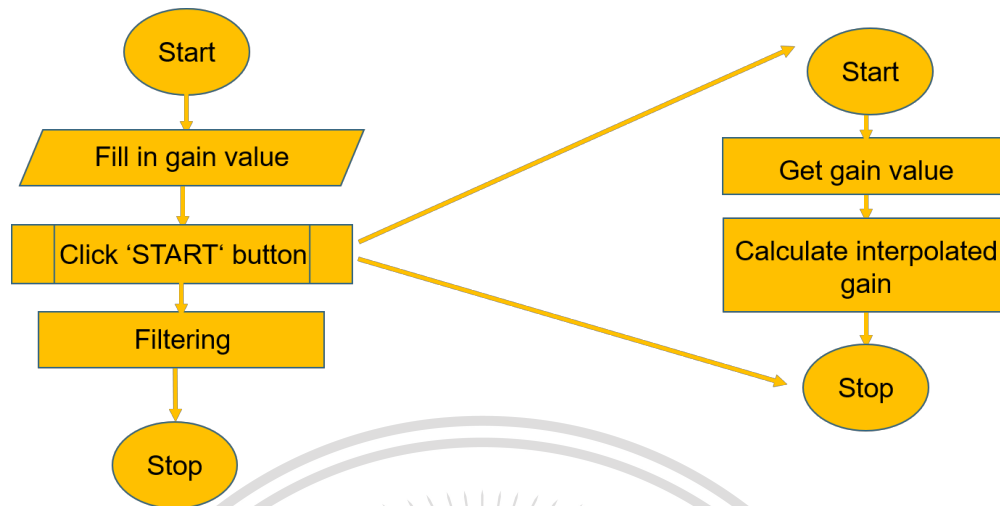
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากการกลับ audiogram จากรูปที่ 5.15 (Ideal filter) กับ matching filter

การทำงานโดยรวมของแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟังแสดงดังผังงาน flowchart รูปที่ 5.17 โดยหน้าต่างในการทำงานหลัก แสดงดังรูปที่ 5.18 จะมีส่วนให้กรอกข้อมูลค่าระดับเสียงสัญญาณที่วัดได้จากแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน เมื่อกรอกค่าต่างๆ เรียบร้อยแล้วกดปุ่ม START เพื่อให้แอปพลิเคชันเริ่มทำงาน โดยสถานะด้านล้างปุ่มจะเปลี่ยนเป็น ACTIVE การทำงานภายในแอปพลิเคชันนั้นจะนำค่าระดับเสียงสัญญาณที่ผู้ใช้งานกรอกไว้ ไปคำนวณหาค่าระดับเสียงสัญญาณจาก 7 ค่าเป็น 8 ค่า หรือ interpolated gain ดังคำสั่งที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.19 แล้วนำค่า interpolated gain ไปใช้ในการปรับหรือควบคุมแอมพลิจูดของวงจรกรองความถี่ทั้ง 8 ช่วงที่ได้ทำการเขียนคำสั่งไว้ในแอปพลิเคชันแล้ว

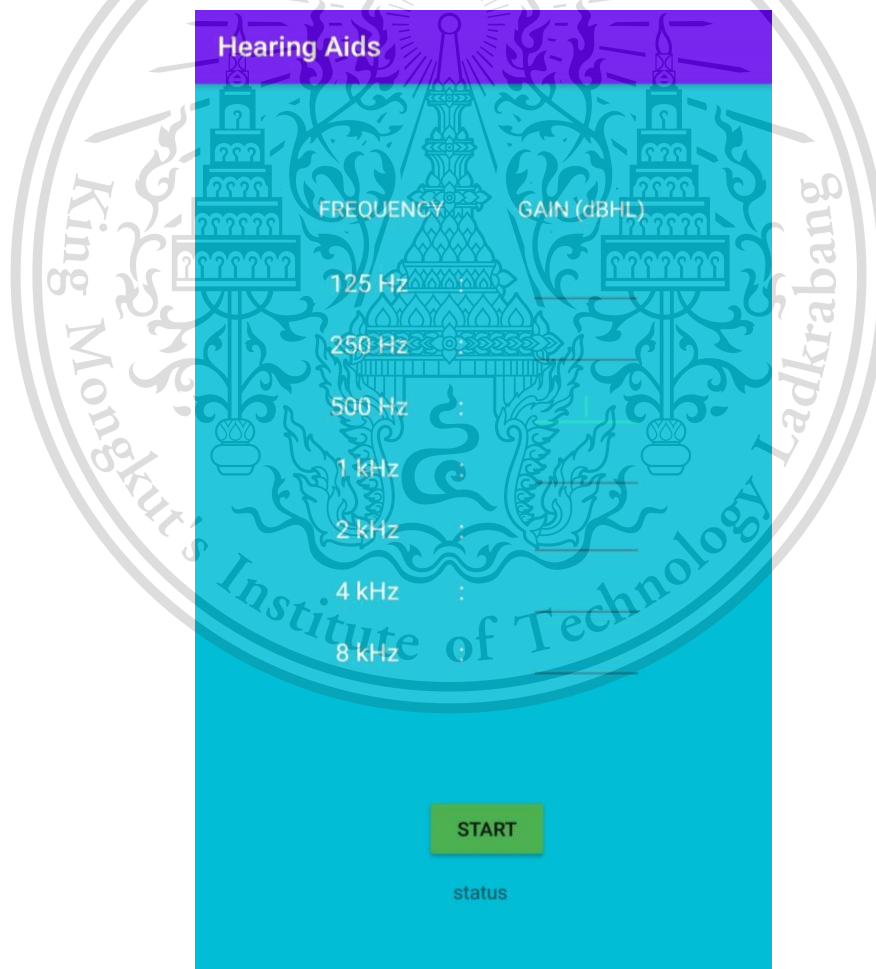
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.17 ผังงาน flowchart แสดงการทำงานโดยรวมของแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง



รูปที่ 5.18 หน้าต่างการทำงานแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

133 public void buttonStart(View view) {
134     G125 = Short.parseShort(editText2.getText().toString());
135     G250 = Short.parseShort(editText.getText().toString());
136     G500 = Short.parseShort(editText3.getText().toString());
137     G1K = Short.parseShort(editText4.getText().toString());
138     G2K = Short.parseShort(editText5.getText().toString());
139     G4K = Short.parseShort(editText6.getText().toString());
140     G8K = Short.parseShort(editText7.getText().toString());
141
142     G1 = (short)((((G250-G125)/(250-125))*200) + G125);
143     G2 = (short)((((G1K-G500)/(1000-500))*640) + G500);
144     G3 = (short)((((G2K-G1K)/(2000-1000))*1360) + G1K);
145     G4 = (short)((((G4K-G2K)/(4000-2000))*2720) + G2K);
146     G5 = (short)((((G8K-G4K)/(8000-4000))*5360) + G4K);
147     G6 = (short)((((G8K-G4K)/(8000-4000))*6560) + G4K);
148     G7 = (short)((((G8K-G4K)/(8000-4000))*7360) + G4K);
149     G8 = (short)((((G8K-G4K)/(8000-4000))*7840) + G4K);
150
151     g1 = (short)(Math.pow(10,G1/20));
152     g2 = (short)(Math.pow(10,G2/20));
153     g3 = (short)(Math.pow(10,G3/20));
154     g4 = (short)(Math.pow(10,G4/20));
155     g5 = (short)(Math.pow(10,G5/20));
156     g6 = (short)(Math.pow(10,G6/20));
157     g7 = (short)(Math.pow(10,G7/20));
158     g8 = (short)(Math.pow(10,G8/20));
159
160     isActive = true;
161     //intGain = Integer.parseInt(editTextGainFactor.getText().toString());*/
162     textViewStatus.setText("Active");
163     textViewStatus.setTextColor(getResources().getColor(R.color.white));
164     thread.start();
165
166 }

```

รูปที่ 5.19 คำสั่งที่ใช้ในการคำนวณค่า interpolated gain จากค่าระดับเสียงสัญญาณที่กรอกไว้ในหน้าต่างแอปพลิเคชันหลังจากที่กดปุ่ม START

ส่วนประกอบหลักของการสร้างวงจรกรองความถี่มี 3 ส่วนคือ unit delay, วงจรคูณ (multiplier) และวงจรวก (adder) ซึ่งผู้จัดทำได้ทำการเขียนคำสั่งเพื่อสร้างบัพเฟอร์ขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ unit delay แสดงดังรูปที่ 5.20 โดยบัพเฟอร์เหล่านี้จะเป็นข้อมูลประเภท short และเป็นขนาดข้อมูลที่น้อยที่สุดเพื่อให้การประมวลผลสัญญาณรวดเร็วเป็นไปตามการสื่อสารในระบบเวลาจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

253     if (bufferList.size() == slotTime) {
254         buffer2 = bufferList.get(2);
255         buffer4 = bufferList.get(4);
256         buffer6 = bufferList.get(6);
257         buffer8 = bufferList.get(8);
258         buffer9 = bufferList.get(9);
259         buffer10 = bufferList.get(10);
260         buffer12 = bufferList.get(12);
261         buffer14 = bufferList.get(14);
262         buffer16 = bufferList.get(16);
263         buffer18 = bufferList.get(18);
264         buffer19 = bufferList.get(19);
265         buffer20 = bufferList.get(20);
266         buffer22 = bufferList.get(22);
267         buffer24 = bufferList.get(24);
268         buffer26 = bufferList.get(26);
269         buffer28 = bufferList.get(28);
270         buffer30 = bufferList.get(30);
271         buffer32 = bufferList.get(32);
272         buffer34 = bufferList.get(34);
273         buffer36 = bufferList.get(36);
274         buffer38 = bufferList.get(38);
275         buffer40 = bufferList.get(40);
276         buffer44 = bufferList.get(44);
277         buffer48 = bufferList.get(48);
278         buffer52 = bufferList.get(52);
279         buffer56 = bufferList.get(56);
280         buffer60 = bufferList.get(60);
281         buffer64 = bufferList.get(64);
282         buffer68 = bufferList.get(68);
283         buffer72 = bufferList.get(72);
284         buffer76 = bufferList.get(76);
285         buffer80 = bufferList.get(80);
286         buffer88 = bufferList.get(88);
287         buffer96 = bufferList.get(96);
288         buffer104 = bufferList.get(104);
289         buffer112 = bufferList.get(112);
290         buffer120 = bufferList.get(120);
291         buffer128 = bufferList.get(128);
292         buffer136 = bufferList.get(136);
293         buffer144 = bufferList.get(144);
294         buffer152 = bufferList.get(152);
295     }

```

รูปที่ 5.20 คำสั่งในการสร้างบัฟเฟอร์ที่ใช้ทั้งหมดในการสร้างวงจรกรองความถี่

ในส่วนของวงจรคูนที่ใช้ในการคูนค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองความถี่ซึ่งโดยปกติแล้วตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์แบบจำกัด หรือ FIR filter นั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมือนกันเป็นแบบสมมาตร จึงสามารถยุบรวมค่าสัมประสิทธิ์ได้เป็นแบบ linear-phase structure ได้ แต่การไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เขียนคำสั่งในส่วนนี้ผู้จัดทำได้ทำเพียงแค่ลดจำนวนตัวแปรที่มีค่าซ้ำกันเท่านั้น เพื่อลดความสับสน แสดงดังรูปที่ 5.21 โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดเป็นผลที่ได้มาจากการเขียนคำสั่งในโปรแกรม MATLAB ค่าสัมประสิทธิ์ A1 ถึง A6 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรองความถี่  $H(z)$ ,  $H(z^2)$ ,  $H(z^4)$  และ  $H(z^8)$  ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ A6 ถึง A11 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรองความถี่  $H_c(z)$  และค่าสัมประสิทธิ์ B1 ถึง B11 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรองความถี่  $F_m(z)$ ,  $F_m(z^2)$  และ  $F_m(z^4)$  ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ B11 ถึง B21 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรองความถี่  $F_{mc}(z)$

```

511 }
512     double A1 = 0.0011;
513     double A2 = -0.0071;
514     double A3 = 0.0262;
515     double A4 = -0.078;
516     double A5 = 0.3078;
517     double A6 = 0.5;
518     double A7 = -0.3078;
519     double A8 = 0.078;
520     double A9 = -0.0262;
521     double A10 = 0.0071;
522     double A11 = -0.0011;
523
524     double B1=-0.000216;
525     double B2=0.000793;
526     double B3=-0.0021;
527     double B4=0.0047;
528     double B5=-0.0092;
529     double B6=0.0168;
530     double B7=-0.0292;
531     double B8=0.051;
532     double B9=-0.098;
533     double B10=0.3155;
534     double B11=0.5;
535     double B12=-0.3155;
536     double B13=0.098;
537     double B14=-0.051;
538     double B15=0.0292;
539     double B16=-0.0168;
540     double B17=0.0092;
541     double B18=-0.0047;
542     double B19=0.0021;
543     double B20=-0.000793;
544     double B21=0.000216;
545

```

รูปที่ 5.21 ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างวงจรรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ส่วนการสร้างวงจรรองความถี่  $H(z)$ ,  $H(z^2)$ ,  $H(z^4)$ ,  $H(z^8)$ ,  $H_c(z)$ ,  $F_m(z)$ ,  $F_m(z^2)$ ,  $F_m(z^4)$  และ  $F_{mc}(z)$  จากบัพเฟอร์และค่าสัมประสิทธิ์ที่กล่าวไว้ก่อนหน้า แสดงดังรูปที่ 5.22 และนำวงจรรองความถี่ทั้งหมดมา interpolate กันดังคำสั่งที่แสดงในรูปที่ 5.23

```

546 // if (bufferList.size() == slotTime) {
547 //
548 //     for (int i = 0; i < shortAudioData.length; i++) {
549 //
550 //         H = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer2[i] + A3 * buffer4[i] + A4 * buffer6[i] + A5 * buffer8[i] + A6 * buffer9[i]
551 //             + A5 * buffer10[i] + A4 * buffer12[i] + A3 * buffer14[i] + A2 * buffer16[i] + A1 * buffer18[i]);
552 //         H2 = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer4[i] + A3 * buffer8[i] + A4 * buffer12[i] + A5 * buffer16[i] + A6 * buffer18[i]
553 //             + A5 * buffer20[i] + A4 * buffer24[i] + A3 * buffer28[i] + A2 * buffer32[i] + A1 * buffer36[i]);
554 //         H4 = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer8[i] + A3 * buffer16[i] + A4 * buffer24[i] + A5 * buffer32[i] + A6 * buffer36[i]
555 //             + A5 * buffer40[i] + A4 * buffer48[i] + A3 * buffer56[i] + A2 * buffer64[i] + A1 * buffer72[i]);
556 //         H8 = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer16[i] + A3 * buffer32[i] + A4 * buffer48[i] + A5 * buffer64[i] + A6 * buffer72[i]
557 //             + A5 * buffer80[i] + A4 * buffer96[i] + A3 * buffer112[i] + A2 * buffer128[i] + A1 * buffer144[i]);
558 //         HC = (short) (A11 * shortAudioData[i] + A10 * buffer2[i] + A9 * buffer4[i] + A8 * buffer6[i] + A7 * buffer8[i] + A6 * buffer9[i]
559 //             + A7 * buffer10[i] + A8 * buffer12[i] + A9 * buffer14[i] + A10 * buffer16[i] + A11 * buffer18[i]);
560 //
561 //         F = (short) (B1 * shortAudioData[i] + B2 * buffer2[i] + B3 * buffer4[i] + B4 * buffer6[i] + B5 * buffer8[i] + B6 * buffer10[i]
562 //             + B7 * buffer12[i] + B8 * buffer14[i] + B9 * buffer16[i] + B10 * buffer18[i] + B11 * buffer19[i] + B10 * buffer20[i]
563 //             + B9 * buffer22[i] + B8 * buffer24[i] + B7 * buffer26[i] + B6 * buffer28[i] + B5 * buffer30[i] + B4 * buffer32[i]
564 //             + B3 * buffer34[i] + B2 * buffer36[i] + B1 * buffer38[i]);
565 //         F2 = (short) (B1 * shortAudioData[i] + B2 * buffer4[i] + B3 * buffer8[i] + B4 * buffer12[i] + B5 * buffer16[i] + B6 * buffer20[i]
566 //             + B7 * buffer24[i] + B8 * buffer28[i] + B9 * buffer32[i] + B10 * buffer36[i] + B11 * buffer38[i] + B10 * buffer40[i]
567 //             + B9 * buffer44[i] + B8 * buffer48[i] + B7 * buffer52[i] + B6 * buffer56[i] + B5 * buffer60[i] + B4 * buffer64[i]
568 //             + B3 * buffer68[i] + B2 * buffer72[i] + B1 * buffer76[i]);
569 //         F4 = (short) (B1 * shortAudioData[i] + B2 * buffer8[i] + B3 * buffer16[i] + B4 * buffer24[i] + B5 * buffer32[i] + B6 * buffer40[i]
570 //             + B7 * buffer48[i] + B8 * buffer56[i] + B9 * buffer64[i] + B10 * buffer72[i] + B11 * buffer76[i] + B10 * buffer80[i]
571 //             + B9 * buffer88[i] + B8 * buffer96[i] + B7 * buffer104[i] + B6 * buffer112[i] + B5 * buffer120[i] + B4 * buffer128[i]
572 //             + B3 * buffer136[i] + B2 * buffer144[i] + B1 * buffer152[i]);
573 //         FC = (short) (B21 * shortAudioData[i] + B20 * buffer2[i] + B19 * buffer4[i] + B18 * buffer6[i] + B17 * buffer8[i] + B16 * buffer10[i]
574 //             + B15 * buffer12[i] + B14 * buffer14[i] + B13 * buffer16[i] + B12 * buffer18[i] + B11 * buffer19[i] + B12 * buffer20[i]
575 //             + B13 * buffer22[i] + B14 * buffer24[i] + B15 * buffer26[i] + B16 * buffer28[i] + B17 * buffer30[i] + B18 * buffer32[i]
576 //             + B19 * buffer34[i] + B20 * buffer36[i] + B21 * buffer38[i]);

```

รูปที่ 5.22 คำสั่งที่ใช้ในการสร้างวงจรรองความถี่ทั้งหมด

```

578 //         P1 = (short) (H8 * F4 * F2 * F);
579 //         P2 = (short) (H4 * F2 * F);
580 //         P3 = (short) (H2 * F);
581 //         P4 = H;
582 //         P5 = HC;
583 //         P6 = (short) (H2 * FC);
584 //         P7 = (short) (H4 * F2 * FC);
585 //         P8 = (short) (H8 * F4 * F2 * FC);
586 //
587 //         b1 = (short) (Math.abs(P1));
588 //         b2 = (short) (Math.abs(P2) - Math.abs(P1));
589 //         b3 = (short) (Math.abs(P3) - Math.abs(P2));
590 //         b4 = (short) (Math.abs(P4) - Math.abs(P3));
591 //         b5 = (short) (Math.abs(P5) - Math.abs(P6));
592 //         b6 = (short) (Math.abs(P6) - Math.abs(P7));
593 //         b7 = (short) (Math.abs(P7) - Math.abs(P8));
594 //         b8 = (short) (Math.abs(P8));
595 //
596 //         BG = (short) ((g1 * b1 + g2 * b2 + g3 * b3 + g4 * b4 + g5 * b5 + g6 * b6 + g7 * b7 + g8 * b8) / 100);
597 //
598 //         shortAudioData[i] = BG;
599 //     }

```

รูปที่ 5.23 คำสั่งสำหรับนำวงจรรองความถี่ทั้งหมดมา interpolation กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสร้างและวัดผลการสร้าง FIR filter มีดังนี้

### 5.2.1 โปรแกรม Android Studio

ใช้สำหรับออกแบบ และเขียนโปรแกรมภาษา java เพื่อสร้างแอปพลิเคชัน แล้วทำการติดตั้งแอปพลิเคชันที่สร้างเสร็จลงในโทรศัพท์สมาร์ทโฟน เพื่อตรวจสอบการทำงาน

### 5.2.2 โทรศัพท์สมาร์ทโฟน

ใช้สำหรับทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชันที่ทำการออกแบบไว้จากโปรแกรม Android Studio

## 5.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

### 5.3.1 การจัดเก็บผลการทดสอบแอปพลิเคชันสำหรับรับเสียงเข้าแล้วส่งเสียงออกในระบบเวลาจริง

การทดลองออกแบบแอปพลิเคชันประมวลผลสัญญาณในระบบเวลาจริงจะสำเร็จเมื่อแอปพลิเคชันที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม Android Studio สามารถทำการประมวลผลสัญญาณได้จริง โดยการจัดเก็บผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องนั้นสามารถทำได้โดยการสั่งติดตั้งโปรแกรมลงบนโทรศัพท์สมาร์ทโฟนที่รองรับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ แล้วทดลองรับเสียงพูดเข้า หากแอปพลิเคชันสามารถประมวลผลสัญญาณเสียงพูดที่รับเข้าไป แล้วส่งผลลัพธ์เป็นสัญญาณเสียงเดิมออกมาได้โดยทันที ถือว่าการออกแบบและสร้างแอปพลิเคชันนั้นสำเร็จสามารถนำไปใช้งานต่อได้ แต่หากผลลัพธ์ที่ได้ไม่ตรงตามต้องการ หรือเกิดความล่าช้าของเสียงมากเกินไป ก็จะต้องนำมาตรวจสอบใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเพื่อหาสาเหตุของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นและทำการแก้ไขให้บรรลุคุณลักษณะที่กำหนดไว้

### 5.3.2 การจัดเก็บผลการทดสอบแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน

ฟังเสียงสัญญาณไซน์ทั้ง 7 ความถี่ที่สร้างออกมาจากแอปพลิเคชันว่าคล้ายคลึงกับเสียงต้นแบบหรือไม่ ในส่วนของเกณฑ์หรือระดับเสียงสัญญาณจะต้องทำการตั้งค่าและคำนวณให้แม่นยำ

### 5.3.3 การจัดเก็บผลการทดสอบแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง

สามารถเพิ่มระดับเสียงในแต่ละความถี่เพื่อลดความบกพร่องด้านการได้ยินได้จริง โดยในผลการจำลองผลตอบสนองในแกนเวลาอาจทำการสร้างสัญญาณไซน์เข้าไปเพื่อดูแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตว่าสอดคล้องกับค่าที่ปรับหรือไม่ หากทำการทดสอบโดยง่ายโดยใช้การฟังคือ เมื่อทำการเปิดเสียงความถี่นั้นๆ เข้าไป แอปพลิเคชันสามารถนำเสียงนั้นออกมาในระดับเสียงที่กำหนดไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.4 ผลการทดลอง

ผลการทดลองสำหรับในส่วนของแอปพลิเคชันนั้นส่วนมากจะวัดผลได้เพียงแค่การฟังเสียงและเทียบกับทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดได้

### 5.4.1 ผลการทดสอบแอปพลิเคชันสำหรับรับเสียงเข้าแล้วส่งเสียงออกในระบบเวลาจริง

แอปพลิเคชันสามารถส่งเสียงออกมาได้ในทันทีที่นำเสียงเข้าไปโดยไม่มีส่วนของสัญญาณรบกวนเข้ามาทำให้การนำเข้าหรือส่งออกเสียงผิดพลาด

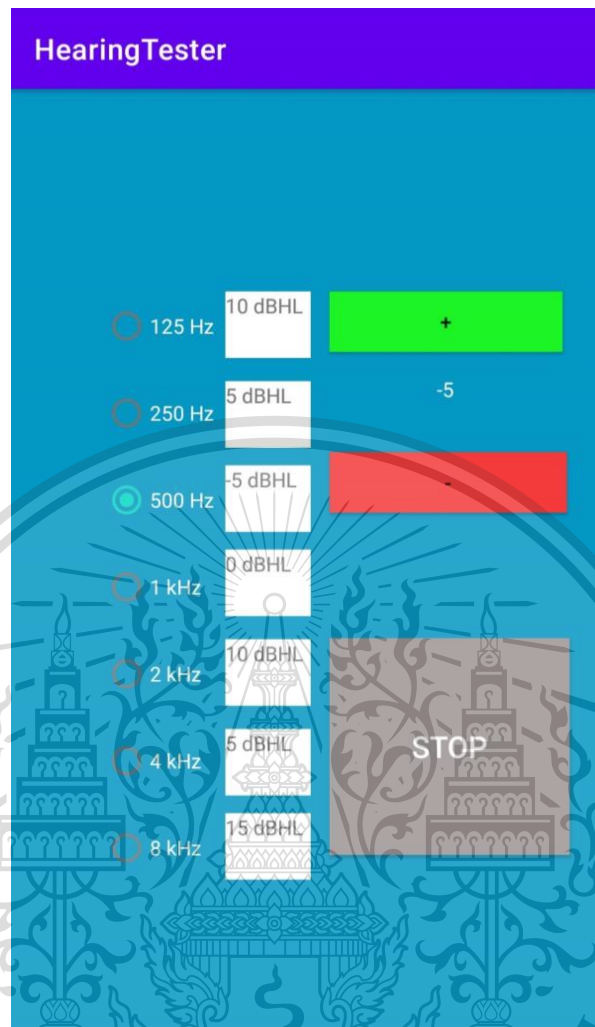
### 5.4.2 ผลการทดสอบแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน

แอปพลิเคชันสามารถสร้างเสียงความถี่ทั้ง 7 ความถี่ได้ สามารถปรับความดังเบาของเสียงที่สร้างออกมาตามค่าระดับสัญญาณเสียงที่ปรับบนหน้าต่างแอปพลิเคชันได้ คือเมื่อปรับค่าเพิ่มขึ้นเสียงสัญญาณดังขึ้นและเมื่อลดค่าลงระดับเสียงสัญญาณลดลง สามารถแสดงผลข้อมูลค่าระดับเสียงสัญญาณที่วัดได้ในความถี่ก่อนหน้าค่าจัวบนหน้าจอโทรศัพท์ได้ แสดงดังรูปที่ 5.24 และสามารถแทนที่ค่าระดับเสียงสัญญาณเก่าด้วยค่าที่ทดสอบใหม่ได้ทันที โดยไม่ต้องทำการกดล้างข้อมูลหรือปิดแอปพลิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.24 หน้าต่างแอปพลิเคชันเมื่อทำการทดสอบการได้ยินทุกค่าความถี่แล้ว

### 5.4.3 ผลการทดสอบแอปพลิเคชันเครื่องช่วยฟัง

เมื่อทำการกรอกค่าระดับสัญญาณเสียงเรียบร้อยแล้วและทำการกดปุ่ม START สถานะด้านล่างปุ่มจะเปลี่ยนเป็น ACTIVE แอปพลิเคชันจะเริ่มทำงาน แสดงหน้าต่างดังกล่าวดังรูปที่ 5.25 โดยในช่วงแรกของการใช้งานแอปพลิเคชันสามารถนำเข้าเสียงและส่งออกเสียงได้ในรูปแบบระบบเวลาจริงแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดสัญญาณเสียงรบกวนขึ้นจนไม่สามารถสื่อสารได้ตามปกติ ซึ่งจากการคาดคะเนเบื้องต้นอาจเกิดจากการเขียนคำสั่งที่ใช้ตัวบัพเฟอร์ในโปรแกรม android studio ให้ทำหน้าที่เป็นตัว unit delay เพื่อให้การทำงานของแอปพลิเคชันเป็นไปในระบบเวลาจริง ซึ่งอาจทำให้การทำงานผิดพลาดจนเกิดสัญญาณรบกวนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Hearing Aids	
FREQUENCY	GAIN (dBHL)
125 Hz	10
250 Hz	5
500 Hz	-5
1 kHz	0
2 kHz	10
4 kHz	5
8 kHz	15

START  
Active

รูปที่ 5.25 แสดงหน้าต่างแอปพลิเคชันเมื่อกรอกค่าต่างๆเรียบร้อยแล้ว และขณะแอปพลิเคชันกำลังทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผล

ปริญญาานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำความรู้ที่ได้จากการเรียนวิชาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมาต่อยอด เพื่อให้เห็นภาพว่าการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถนำมาใช้ได้จริงและยังทำให้เห็นว่า การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้นไม่ใช่เรื่องไกลตัว จากการศึกษาความรู้ในรายวิชา digital signal processing คณะผู้จัดทำเกิดความสนใจที่จะจัดทำปริญญาานิพนธ์ในหัวข้อดังกล่าวโดยจะเน้นไปที่เรื่องของ digital filter ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้งานในส่วนของฮาร์ดแวร์โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง Simulink และบอร์ด STM32F769I รวมถึงนำเอาองค์ความรู้ที่ได้ไปจัดทำ Experimental Hand Book เพื่อเป็นคู่มือที่ช่วยอำนวยความสะดวก รวมถึงนำเสนอวิธีการในการสร้างดิจิทัลฟิลเตอร์และนำเอาฟิลเตอร์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ต่อไปได้อย่างรวดเร็วให้แก่ผู้ที่มีความสนใจในงานพัฒนาด้านนี้และส่วนของแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android ซึ่งจะนำไปพัฒนาต่อเป็นแอปพลิเคชันสำหรับผู้ที่บกพร่องทางการได้ยิน

ในภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2563 คณะผู้จัดทำได้ทำการออกแบบ digital filter ให้พร้อมใช้งาน โดย digital filter ที่คณะผู้จัดทำเลือกจะเป็น FIR Filter และ IIR filter ซึ่งในส่วนของ FIR Filter จะทำการออกแบบด้วยวิธี window function และ frequency sampling โดยวิธี window function สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้าง Graphic Equalizer ส่วน frequency sampling สามารถใช้ในการออกแบบและสร้าง Arbitrary frequency response และ hearing aids และในส่วนของ IIR Filter จะทำการออกแบบด้วยวิธี poles-zeros placement และ bilinear transformation ไปจนถึงการออกแบบรูปแบบเฉพาะด้วย peaking filter ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้าง parametric equalizer จากนั้นทำการทดสอบ digital filter ที่ออกแบบโดยใช้เครื่อง dynamic analyzer เพื่อดูผลใน frequency domain และใช้เครื่องออสซิลอสโคปเพื่อดูผลใน time domain พบว่าผลที่ออกมานั้นเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ผู้จัดทำยังได้ทดลองออกแบบแอปพลิเคชันซึ่งสามารถประมวลผลได้แบบ real time

ในภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2563 คณะผู้จัดทำได้นำเอาผลที่ได้จากการสร้างดิจิทัลฟิลเตอร์ในภาคเรียนที่ 1 มาเรียบเรียงและจัดทำเป็น Experimental Hand Book ซึ่งมีเนื้อหารายละเอียดเกี่ยวกับบอร์ด STM32F769I เบื้องต้น, การ Implement ดิจิทัลฟิลเตอร์กับบอร์ด อีกทั้งยังมีส่วนของ PIL Technique ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานกับ Processor จริง รวมถึงการวัดและประมวลผลแบบเสมือนโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ และส่วนของแอปพลิเคชันบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โทรศัพท์มือถือสามารถนำเสียงเข้าออกตามระบบเวลาจริงได้และส่วนของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินสามารถสร้างเสียงสัญญาณโชนความถี่ต่างๆ

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การประมวลผลสัญญาณเสียงดิจิทัลในระบบเวลาจริงและแอปพลิเคชันนั้น ในส่วนของการที่จะสร้างระบบให้เป็น real time นั้นค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องด้วยข้อจำกัดของทางระบบแอปพลิเคชันต่างๆ รวมทั้งการวัดผลการทดลองในส่วนนี้นั้นไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดได้นอกจากการฟังเสียงและเปรียบเทียบกับทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม

- [1] techopedia. “Digital Signal Processing (DSP)”  
<https://www.techopedia.com/definition/2360/digital-signal-processing-dsp>
- [2] วัฒนา เมธาวิสิน. “Real –Time Programming and System” รายงานการวิจัยในวิชา CPE 489, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, มหาวิทยาลัยรังสิต, 2551.
- [3] บ้านจอมยุทธ. “ระบบเรียลไทม์ (Real-Time System)”  
[https://www.banjomyut.com/library\\_2/extension-1/internet/10.html](https://www.banjomyut.com/library_2/extension-1/internet/10.html)
- [4] Guru99. “Analog vs Digital : What’s the Difference?”  
<https://www.guru99.com/analog-vs-digital.html>
- [5] OREILLY. “Analog signal – Internet of Things with Raspberry Pi 3”  
<https://www.oreilly.com/library/view/internet-of-things/9781788627405/5743567f-cebf-471c-ab02-5807aca5e9c2.xhtml>
- [6] plymouth. “Digital Signal (Glossary Entry)”  
<https://www.guru99.com/analog-vs-digital.html>
- [7] primusthai. “สัญญาณ Analog และ Digital ต่างกันอย่างไร”  
<https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=132>
- [8] wikipedia. “Effective number of bits”  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Effective\\_number\\_of\\_bits](https://en.wikipedia.org/wiki/Effective_number_of_bits)
- [9] wikipedia. “Analog-to-digital converter”  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter)
- [10] wikipedia. “Digital-to-analog converter”  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Digital-to-analog\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital-to-analog_converter)
- [11] wikipedia. “Finite impulse response”  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_impulse\\_response](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_impulse_response)
- [12] ดร.พีระพล ยุวภูษิตานนท์. “FIR Filter Design การออกแบบตัวกรองดิจิตอลแบบ FIR”  
[https://embedsigproc.files.wordpress.com/2008/09/dsp\\_2552\\_8.pdf](https://embedsigproc.files.wordpress.com/2008/09/dsp_2552_8.pdf)
- [13] wikipedia. “Infinite impulse response”  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Infinite\\_impulse\\_response](https://en.wikipedia.org/wiki/Infinite_impulse_response)
- [14] millionheadpro. “มาทำความรู้จัก Equalizer อย่างลึกซึ้งกันเถอะ”  
<https://millionheadpro.com/blog-detail.php?id=40>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [15] Yamaha Music Thailand. “อีคิว (EQ) Equalizer คืออะไร?”  
<https://www.facebook.com/yamahamusicthailand/posts/765256153604977/>
- [16] Netinbag. “Daughterboard คืออะไร”  
<https://www.netinbag.com/th/internet/what-is-a-daughterboard.html>
- [17] stlife. “Discovery kit with STM32F769NI MCU”  
[https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00276557-discovery-kit-with-stm32f769ni-mcu-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00276557-discovery-kit-with-stm32f769ni-mcu-stmicroelectronics.pdf)
- [18] Bumrungrad. “เมื่อการสูญเสียการได้ยินทำร้ายคุณมากกว่าที่คิด”  
<https://www.bumrungrad.com/th/health-blog/october-2019/hearing-loss>
- [19] Binla Book. “ระบบการยินและการสูญเสียการได้ยิน”  
[https://meded.psu.ac.th/binla/class04/388\\_471/Hearing\\_loss/index.html](https://meded.psu.ac.th/binla/class04/388_471/Hearing_loss/index.html)
- [20] Tang Bin. “A Study On Wireless Hearing Aids System Configuration And Simulation.” a thesis submitted for the degree of master, science graduate program in bioengineering, National University of Singapore, 2005.
- [21] Vesa Välimäki, Joshua D. Reiss. “All About Audio Equalization.” Solutions and Frontiers. Aalto University, 2016. (CD-ROM).
- [22] Ahmed S. Abutaleb. “IEEE Transactions On Circuits And Systems” An Adaptive Filter for Noise Cancelling, 1988.
- [23] Sebastian J. Schlecht. “Applied Sciences.” Frequency-Dependent Schroeder Allpass Filters. Aalto University, 2019.
- [24] C.H. Slump, C.G.M. van Asma, J.K.P. Barels “Design And Implementation Of A Audio Signal Processing Linear-Phase Equalizer In Digital.” University of Twente, 2017.
- [25] R. A. Greiner, Michael Schoessow “Design Aspects of Graphic Equalizers” Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1983.
- [26] Joshua D. Reiss. “IEEE Transactions On Audio, Speech, And Language Processing” Design of Audio Parametric Equalizer Filters Directly in the Digital Domain, 2011.
- [27] D. S. Sidhu, J. S. Dhillon, Dalveer Kaur. “International Journal of Signal Processing Systems” Design of Higher Order Digital IIR Low Pass Filter Using Hybrid Differential Evolution, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [41] Bohumil Psenicka, Abel herrera Camacho, Francisco Javier García-Ugalde. “The bilinear Z transform by Pascal matrix and its application in the design of digital filters” Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2018.
- [42] Robert Bristow-Johnson. “The Equivalence of Various Methods of Computing Biquad Coefficients for Audio Parametric Equalizers” Wave Mechanics, Inc., Burlington, 2018.
- [43] Phillip A. Regalia, Sanjit K. Mitra. “Tunable Digital Frequency Response Equalization Filters” Delft University, 1986.
- [44] wikipedia. “Pure tone audiometry”  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Pure\\_tone\\_audiometry#Audiograms\\_and\\_hearing\\_loss](https://en.wikipedia.org/wiki/Pure_tone_audiometry#Audiograms_and_hearing_loss)
- [45] Industrial Audiometry. “British Society of Audiology”, 2012
- [46] Warwick Williams. “The calculation of maximum permissible ambient noise levels for audiometric testing to a given threshold level with a specified uncertainty” National Acoustic Laboratories, 2010
- [47] wikipedia. “แอนดรอยด์(ระบบปฏิบัติการ)”  
<https://th.wikipedia.org/wiki/>
- [48] luknam UIC. “ระบบปฏิบัติการ ANDROID และ IOS”  
<https://sites.google.com/site/luknamuic/home/rabb-ptibati-kar-1>
- [49] Palm’s. “เริ่มต้นสร้าง Android Application พื้นฐานด้วย Android studio”  
<https://medium.com/@palmz/>
- [50] วิกิพีเดีย. “จาวา (ภาษาโปรแกรม)”  
[https://th.wikipedia.org/wiki.](https://th.wikipedia.org/wiki/)
- [51] จีระพงษ์ โพพันธ์. “รู้จักภาษาจาวา (JAVA)”  
<https://kru-it.com/java-programming/know-java/>
- [52] developers. “AudioRecord”  
<https://developer.android.com/reference/android/media/AudioRecord>
- [53] developers. “AudioTrack”  
<https://developer.android.com/reference/android/media/AudioTrack>
- [54] Programmer World. “Record and Play the sound simultaneously (live stream over Bluetooth speaker) in your Android App?”  
<https://programmerworld.co/android/record-and-play-the-sound-simultaneously-live-stream-over-bluetooth-speaker-in-your-android-app/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

test methods — Part 1: Pure-tone air and bone conduction audiometry (ISO Standard No. 8253-1).

<https://www.iso.org/standard/43601.html>

[56] Fran Pitrau, “Tone Generator Pure”

<https://github.com/OceanSwift/ToneGeneratorPure>

[57] British Society of Audiology. “Recommended procedure Industrial audiometry” Reading, Berkshire: BSA, 2012.

[58] Krzysztof KRZYŻEK, Maciej KŁACZYŃSKI. “HEARING TESTER - MOBILE APPLICATION FOR HEARING LOSS SCREENING” Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Science and Technology, 2019.

[59] Yong Lian, Ying Wei. “A Computationally Efficient Nonuniform FIR Digital Filter Bank for Hearing Aids” National University of Singapore, 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ก

คำสั่งโปรแกรม Android Studio ของแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำสั่ง 3 ส่วนหลักของการเขียนแอปพลิเคชันทดสอบการได้ยินด้วยโปรแกรม Android Studio แสดงดังนี้

### ส่วน MainActivity

```
import androidx.appcompat.app.AppCompatActivity;
import android.content.Context;
import android.content.SharedPreferences;
import android.content.res.Configuration;
import android.content.res.Resources;
import android.graphics.Color;
import android.media.AudioManager;
import android.os.Bundle;
import android.os.Handler;
import android.view.View;
import android.widget.Button;
import android.widget.RadioButton;
import android.widget.RadioGroup;
import android.widget.TextView;
import android.widget.ToggleButton;
import java.util.ArrayList;
import java.util.Arrays;
import java.util.Collections;
import java.util.List;
import java.util.Locale;
import com.jsyn.JSyn;
import com.jsyn.Synthesizer;
import com.jsyn.unitgen.LineOut;
import com.jsyn.unitgen.SawtoothOscillatorBL;
import com.jsyn.unitgen.Select;
import com.jsyn.ports.UnitOutputPort;
import com.jsyn.unitgen.SquareOscillatorBL;
import com.jsyn.unitgen.UnitVoice;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ย้ำพิงที่ ไม่มีเหตุที่เบี่ยงเบนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

import com.jsyn.ports.UnitInputPort;
import com.jsyn.unitgen.SineOscillator;
import com.softsynth.shared.time.TimeStamp;
import com.jsyn.unitgen.PassThrough;
import com.jsyn.unitgen.WhiteNoise;
import com.jsyn.unitgen.Circuit;
import static java.lang.String.valueOf;

public class MainActivity extends AppCompatActivity {

    private static LineOut lineOut;
    public static TestToneGenerator toneGenerator;
    float mainVolumeFloat = 0.35f;
    float freqData = 440.0f;
    int notesDataHarmonic = 45;
    int sourceFlag = 0;
    public static final int P125 = 0, P250 = 1, P500 = 2, P1K = 3, P2K = 4, P4K = 5, P8K
= 6;
    public static int position = -1;
    public static int difGain = 5;
    public static double calibFact;
    private static List<Integer> gainList;

    private ToggleButton toggleButtonPowerGet;

    // Initialize synthesis engine

    Synthesizer synth = JSyn.createSynthesizer(new JSynAndroidAudioDevice());

    @Override
    protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

super.onCreate(savedInstanceState);

SharedPreferences sharedPref =
getSharedPreferences("PureChordsTestToneGenPref", 0);
if (sharedPref.contains("mainVolume")) {
    mainVolumeFloat = sharedPref.getFloat("mainVolume", mainVolumeFloat);
    freqData = sharedPref.getFloat("freqData", freqData);
    notesDataHarmonic = sharedPref.getInt("notesData", notesDataHarmonic);
    sourceFlag = sharedPref.getInt("sourceFlag", sourceFlag);
}

setContentView(R.layout.activity_main);

Resources res = getApplicationContext().getResources();

Locale locale = new Locale("en");
Locale.setDefault(locale);

Configuration config = new Configuration();
config.locale = locale;

res.updateConfiguration(config, res.getDisplayMetrics());

// Connect synth io

synth.add(lineOut = new LineOut());
synth.add(toneGenerator = new TestToneGenerator());
toneGenerator.output.connect(0, lineOut.input, 0);
toneGenerator.output.connect(0, lineOut.input, 1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ มุมมองที่เผยแพร่เนื้อหา และต้องยกย่องเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
final TextView textView = findViewById(R.id.textView);
```

----- ปุ่มเล่นเสียงสัญญาณและส่วนคำนวณค่าเกน -----

```
toggleButtonPowerGet = findViewById(R.id.toggleButtonPower);
toggleButtonPowerGet.setOnClickListener(new View.OnClickListener() {
    @Override
    public void onClick(View v) {
        if (((ToggleButton) v).isChecked()) {
            if (!synth.isRunning()) {
                AudioManager audioManager = (AudioManager)
getSystemService(Context.AUDIO_SERVICE);
                double currentVolume =
audioManager.getStreamVolume(AudioManager.STREAM_MUSIC);
                double maxVolume =
audioManager.getStreamMaxVolume(AudioManager.STREAM_MUSIC);
                double currentVolumePercentage = currentVolume/maxVolume;
                double ref = currentVolumePercentage*calibFact;
                Double dB = Double.parseDouble(textView.getText().toString());
                double gain = Math.pow(10,(dB+(20*Math.log10(ref))/20));
                toneGenerator.amplitude.set(gain);
                synth.start();
                lineOut.start();
                run(2500);
            }
        }
    }
});
```

```
toggleButtonPowerGet.setBackgroundColor(Color.parseColor("#FF3F51B5"));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

toggleButtonPowerGet.setBackgroundColor(Color.parseColor("#FF3F51B5"));
    }
} else {
    lineOut.stop();
    synth.stop();

toggleButtonPowerGet.setBackgroundColor(Color.parseColor("#9d9494"));
    // powerFlag = 0;
}

}
});

```

----- ชนิดสัญญาณที่สร้าง (สัญญาณไซน์) -----

```

toneGenerator.mSelectSineSaw.select.set(0);
toneGenerator.mSelectFinalSource.select.set(0);
toneGenerator.mSineOsc.setEnabled(true);
toneGenerator.mSawOscBL.setEnabled(false);
toneGenerator.mSquareOscBL.setEnabled(false);
toneGenerator.mWhiteNoise.setEnabled(false);
sourceFlag = 0;

```

----- ส่วนแสดงการเพิ่มและลดค่าเกน -----

---- ส่วนการลดค่าเกนทีละ 10 เดซิเบล ----

```
gainList = new ArrayList<>(Arrays.asList(new Integer[7]));
```

```
Collections.fill(gainList, 40);
```

```
textView.setText("-");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

Button bReduce = findViewById(R.id.button);
Button bGain = findViewById(R.id.button2);
bReduce.setOnClickListener(new View.OnClickListener() {
    @Override
    public void onClick(View v) {
        int before = 40;
        int after;
        if (position == -1) {
            after = before - difGain*2;
        } else {
            before = gainList.get(position);
            after = before - difGain*2;
            gainList.set(position, after);
            final TextView textView2 = findViewById(R.id.textView2);
            textView2.setText(valueOf(gainList.get(P125)));
            textView2.append(" dBHL");

            final TextView textView3 = findViewById(R.id.textView3);
            textView3.setText(valueOf(gainList.get(P250)));
            textView3.append(" dBHL");

            final TextView textView4 = findViewById(R.id.textView4);
            textView4.setText(valueOf(gainList.get(P500)));
            textView4.append(" dBHL");

            final TextView textView5 = findViewById(R.id.textView5);
            textView5.setText(valueOf(gainList.get(P1K)));
            textView5.append(" dBHL");

            final TextView textView6 = findViewById(R.id.textView6);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

textView6.setText(valueOf(gainList.get(P2K)));
textView6.append(" dBHL");

final TextView textView7 = findViewById(R.id.textView7);
textView7.setText(valueOf(gainList.get(P4K)));
textView7.append(" dBHL");

final TextView textView8 = findViewById(R.id.textView8);
textView8.setText(valueOf(gainList.get(P8K)));
textView8.append(" dBHL");
}
textView.setText(valueOf(after));
}
});

--- ส่วนการเพิ่มค่าเกินทีละ 5 เดซิเบล ---

bGain.setOnClickListener(new View.OnClickListener() {
    @Override
    public void onClick(View v) {
        int before = 40;
        int after;
        if (position == -1) {
            after = before + difGain;
        } else {
            before = gainList.get(position);
            after = before + difGain;
            gainList.set(position, after);
        }
    }
});

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น" อีกทั้งยังมีบทลงโทษที่รุนแรง แต่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
final TextView textView2 = findViewById(R.id.textView2);
textView2.setText(valueOf(gainList.get(P125)));
textView2.append(" dBHL");
```

```
final TextView textView3 = findViewById(R.id.textView3);
textView3.setText(valueOf(gainList.get(P250)));
textView3.append(" dBHL");
```

```
final TextView textView4 = findViewById(R.id.textView4);
textView4.setText(valueOf(gainList.get(P500)));
textView4.append(" dBHL");
```

```
final TextView textView5 = findViewById(R.id.textView5);
textView5.setText(valueOf(gainList.get(P1K)));
textView5.append(" dBHL");
```

```
final TextView textView6 = findViewById(R.id.textView6);
textView6.setText(valueOf(gainList.get(P2K)));
textView6.append(" dBHL");
```

```
final TextView textView7 = findViewById(R.id.textView7);
textView7.setText(valueOf(gainList.get(P4K)));
textView7.append(" dBHL");
```

```
final TextView textView8 = findViewById(R.id.textView8);
textView8.setText(valueOf(gainList.get(P8K)));
textView8.append(" dBHL");
```

```
}
```

```
textView.setText(valueOf(after));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
    }
```

```
});
```

----- ส่วนกำหนดค่า calibration factor ของแต่ละความถี่และตำแหน่งปุ่มสำหรับเลือกความถี่ -----

```
final RadioGroup radioGroup = findViewById(R.id.selected);
```

```
radioGroup.setOnCheckedChangeListener(new
```

```
RadioGroup.OnCheckedChangeListener() {
```

```
    @Override
```

```
    public void onCheckedChanged(RadioGroup group, int checkedId) {
```

```
        switch (checkedId) {
```

```
            case R.id.radioButton125:
```

```
                freqData = (125.00f);
```

```
                calibFact = 0.156675107;
```

```
                position = P125;
```

```
                break;
```

```
            case R.id.radioButton250:
```

```
                freqData = (250.00f);
```

```
                calibFact = 0.3715352291;
```

```
                position = P250;
```

```
                break;
```

```
            case R.id.radioButton500:
```

```
                freqData = (500.00f);
```

```
                calibFact = 0.6918309709;
```

```
                position = P500;
```

```
                break;
```

```
            case R.id.radioButton1k:
```

```
                freqData = (1000.00f);
```

```
                calibFact = 1.0;
```

```
                position = P1K;
```

```
                break;
```

```
            case R.id.radioButton2k:
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

        freqData = (2000.00f);
        calibFact = 1.148153621;
        position = P2K;
        break;
    case R.id.radioButton4k:
        freqData = (4000.00f);
        calibFact = 1.122018454;
        position = P4K;
        break;
    case R.id.radioButton8k:
        freqData = (8000.00f);
        calibFact = 0.881048873;
        position = P8K;
        break;
    }
    toneGenerator.frequency.set(freqData);
    textView.setText(valueOf(gainList.get(position)));
}
});

```

----- ส่วนที่ผู้พัฒนาแอปพลิเคชัน Tone Generator Pure เป็นผู้พัฒนาไว้ -----

```

private void run(long timeInMin) {
    final Handler handler = new Handler();
    final Runnable runnable = new Runnable() {
        @Override
        public void run() {
            lineOut.stop();
            synth.stop();
            toggleButtonPowerGet.setBackgroundColor(Color.parseColor("#9d9494"));
            toggleButtonPowerGet.setChecked(false);
        }
    };
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ ไม่มีเห็นแต่เพียงอย่างเดียว และต้องขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อนนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

    }
};
handler.postDelayed(runnable, timeInMin);
}

```

```

public class TestToneGenerator extends Circuit implements UnitVoice {

```

```

    // Declare units and ports.

```

```

    PassThrough mFrequencyPassThrough;

```

```

    public UnitInputPort frequency;

```

```

    PassThrough mAmplitudePassThrough;

```

```

    public UnitInputPort amplitude;

```

```

    PassThrough mOutputPassThrough;

```

```

    public UnitOutputPort output;

```

```

    WhiteNoise mWhiteNoise;

```

```

    Select mSelectSineSaw;

```

```

    SineOscillator mSineOsc;

```

```

    SawtoothOscillatorBL mSawOscBL;

```

```

    SquareOscillatorBL mSquareOscBL;

```

```

    Select mSelectSquareWhite;

```

```

    Select mSelectFinalSource;

```

```

    // Declare inner classes for any child circuits.

```

```

public TestToneGenerator() {

```

```

    // Create unit generators.

```

```

    add(mFrequencyPassThrough = new PassThrough());

```

```

    addPort(frequency = mFrequencyPassThrough.input, "frequency");

```

```

    add(mAmplitudePassThrough = new PassThrough());

```

```

    addPort(amplitude = mAmplitudePassThrough.input, "amplitude");

```

```

    add(mOutputPassThrough = new PassThrough());

```

```

    addPort(output = mOutputPassThrough.output, "output");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ผู้จัดทำเห็นสมควรเป็นอย่างยิ่ง และต้องยกย่องแก่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

add(mWhiteNoise = new WhiteNoise());
add(mSelectSineSaw = new Select());
add(mSineOsc = new SineOscillator());
add(mSawOscBL = new SawtoothOscillatorBL());
add(mSquareOscBL = new SquareOscillatorBL());
add(mSelectSquareWhite = new Select());
add(mSelectFinalSource = new Select());
// Connect units and ports.
mFrequencyPassThrough.output.connect(mSineOsc.frequency);
mFrequencyPassThrough.output.connect(mSawOscBL.frequency);
mFrequencyPassThrough.output.connect(mSquareOscBL.frequency);
mAmplitudePassThrough.output.connect(mWhiteNoise.amplitude);
mAmplitudePassThrough.output.connect(mSineOsc.amplitude);
mAmplitudePassThrough.output.connect(mSawOscBL.amplitude);
mAmplitudePassThrough.output.connect(mSquareOscBL.amplitude);
mWhiteNoise.output.connect(mSelectSquareWhite.inputB);
mSelectSineSaw.output.connect(mSelectFinalSource.inputA);
mSineOsc.output.connect(mSelectSineSaw.inputA);
mSawOscBL.output.connect(mSelectSineSaw.inputB);
mSquareOscBL.output.connect(mSelectSquareWhite.inputA);
mSelectSquareWhite.output.connect(mSelectFinalSource.inputB);
mSelectFinalSource.output.connect(mOutputPassThrough.input);
// Setup
frequency.setup(20.0, 440.0, 22000.0);
amplitude.setup(0.0, 1.0, 1.0);
mSelectSineSaw.select.set(1.0);
mSelectSquareWhite.select.set(0.0);
mSelectFinalSource.select.set(0.0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

public void noteOn(double frequency, double amplitude, TimeStamp timeStamp) {
    this.frequency.set(frequency, timeStamp);
    this.amplitude.set(amplitude, timeStamp);
}

```

```

public void noteOff(TimeStamp timeStamp) {
}

```

```

public UnitOutputPort getOutput() {
    return output;
}
}
}

```

#### ส่วน activity\_main (layout)

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout
xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
xmlns:app="http://schemas.android.com/apk/res-auto"
xmlns:tools="http://schemas.android.com/tools"
android:layout_width="match_parent"
android:layout_height="match_parent"
android:background="#0597C3"
tools:context=".MainActivity">
<TextView
    android:id="@+id/textView5"
    android:layout_width="59dp"
    android:layout_height="46dp"
    android:layout_marginStart="8dp"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ผู้จัดทำได้ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:layout_marginTop="12dp"
android:background="@color/white"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView4" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView6"
    android:layout_width="59dp"
    android:layout_height="46dp"
    android:layout_marginStart="8dp"
    android:layout_marginTop="16dp"
    android:background="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView5" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView7"
    android:layout_width="59dp"
    android:layout_height="46dp"
    android:layout_marginStart="8dp"
    android:layout_marginTop="16dp"
    android:background="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView6" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView8"
    android:layout_width="59dp"
    android:layout_height="46dp"
    android:layout_marginStart="8dp"
    android:layout_marginTop="12dp"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่พิมพ์เผยแพร่เฉพาะในวงจำกัด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:background="@color/white"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView7" />

```

```
<ToggleButton
```

```

android:id="@+id/toggleButtonPower"
android:layout_width="166dp"
android:layout_height="150dp"
android:layout_marginStart="220dp"
android:layout_marginTop="380dp"
android:background="@color/grey"
android:drawableTop="@color/black"
android:textColor="@color/white"
android:textOff="@string/stop"
android:textOn="@string/play"
android:textSize="21dp"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

```
<RadioGroup
```

```

android:id="@+id/selected"
android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_below="@+id/toggleButtonPower"
android:layout_centerHorizontal="true"
android:layout_marginStart="64dp"
android:layout_marginTop="128dp"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"

```

```
app:layout_constraintTop_toTopOf="parent">
```

```
<RadioButton
```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

android:id="@+id/radioButton125"
android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_marginTop="12dp"
android:text="@string/_125_hz"
android:textColor="@color/white"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/toggleButtonPower" />

```

```

<RadioButton
    android:id="@+id/radioButton250"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:layout_marginTop="12dp"
    android:text="@string/_250_hz"
    android:textColor="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/radioButton125" />

```

```

<RadioButton
    android:id="@+id/radioButton500"
    android:layout_width="wrap_content"
    android:layout_height="wrap_content"
    android:layout_marginTop="12dp"
    android:text="@string/_500_hz"
    android:textColor="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/radioButton250" />

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

android:id="@+id/radioButton1k"

```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_marginTop="12dp"
android:text="@string/_1_khz"
android:textColor="@color/white"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/radioButton500" />

```

```
<RadioButton
```

```

android:id="@+id/radioButton2k"
android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_marginTop="12dp"
android:text="@string/_2_khz"
android:textColor="@color/white"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/radioButton1k" />

```

```
<RadioButton
```

```

android:id="@+id/radioButton4k"
android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_marginTop="12dp"
android:text="@string/_4_khz"
android:textColor="@color/white"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/radioButton2k" />

```

```
<RadioButton
```

```

android:id="@+id/radioButton8k"
android:layout_width="wrap_content"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ ไม่มีเหตุที่ข้อยกเว้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

        android:layout_height="wrap_content"
        android:layout_marginTop="12dp"
        android:text="@string/_8_khz"
        android:textColor="@color/white"
        app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
        app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/radioButton4k" />
</RadioGroup>

```

```

<com.rey.material.widget.Button
    android:id="@+id/button"
    android:layout_width="164dp"
    android:layout_height="42dp"
    android:layout_marginStart="220dp"
    android:layout_marginTop="17dp"
    android:background="#F43A3A"
    android:text="-"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView" />

```

```

<com.rey.material.widget.Button
    android:id="@+id/button2"
    android:layout_width="161dp"
    android:layout_height="42dp"
    android:layout_marginStart="220dp"
    android:layout_marginTop="140dp"
    android:background="@color/green"
    android:text="+"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
<TextView
```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:id="@+id/textView"
android:layout_width="160dp"
android:layout_height="36dp"
android:layout_marginStart="80dp"
android:layout_marginTop="16dp"
android:textAlignment="center"
android:textColor="@color/white"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/button2" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView2"
    android:layout_width="59dp"
    android:layout_height="46dp"
    android:layout_marginStart="8dp"
    android:layout_marginTop="140dp"
    android:background="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
    app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView3"
    android:layout_width="59dp"
    android:layout_height="46dp"
    android:layout_marginStart="8dp"
    android:layout_marginTop="16dp"
    android:background="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView2" />

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<TextView  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:id="@+id/textView4"
android:layout_width="59dp"
android:layout_height="46dp"
android:layout_marginStart="8dp"
android:layout_marginTop="12dp"
android:background="@color/white"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/selected"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView3" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView9"
    android:layout_width="100dp"
    android:layout_height="60dp"
    android:layout_marginStart="172dp"
    android:layout_marginTop="56dp"
    android:textColor="@color/white"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

```
</androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout>
```

### ส่วน Manifest

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<manifest xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
    package="com.example.hearingtester">

    <uses-permission android:name="android.permission.MODIFY_AUDIO_SETTINGS" />

```

```

<application
    android:allowBackup="true"
    android:icon="@mipmap/ic_launcher"

```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:label="@string/app_name"
android:roundIcon="@mipmap/ic_launcher_round"
android:supportsRtl="true"
android:theme="@style/Theme.HearingTester">
<activity
    android:name=".MainActivity"
    android:screenOrientation="portrait">
    <intent-filter>
        <action android:name="android.intent.action.MAIN" />

        <category android:name="android.intent.category.LAUNCHER" />
    </intent-filter>
</activity>
</application>
</manifest>

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข

คำสั่งโปรแกรม Android Studio ของแอปพลิเคชันช่วยฟัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำสั่ง 3 ส่วนหลักของการเขียนแอปพลิเคชันช่วยฟังด้วยโปรแกรม Android Studio แสดง  
ดังนี้

### ส่วน MainActivity

```
import androidx.appcompat.app.AppCompatActivity;
import androidx.core.app.ActivityCompat;
import android.Manifest;
import android.content.pm.PackageManager;
import android.media.AudioFormat;
import android.media.AudioManager;
import android.media.AudioRecord;
import android.media.AudioTrack;
import android.media.MediaRecorder;
import android.os.Bundle;
import android.util.Log;
import android.view.View;
import android.widget.EditText;
import android.widget.TextView;
import java.util.ArrayList;
import java.util.List;

public class MainActivity extends AppCompatActivity {

    private TextView textViewStatus;
    private AudioRecord audioRecord;
    private AudioTrack audioTrack;
    private int intBufferSize;
    private short[] shortAudioData;
    private short H, H2, H4, H8, HC, F, F2, F4, FC, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, b1, b2,
    b3, b4, b5, b6, b7, b8;
    private boolean isActive = false;
    private short G125,G250,G500,G1K,G2K,G4K,G8K, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8, g1,
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

g2, g3, g4, g5, g6, g7, g8, BG;
    private EditText
editText,editText2,editText3,editText4,editText5,editText6,editText7;
    private Thread thread;
private short[] buffer2, buffer3, buffer4, buffer6, buffer8, buffer9, buffer10, buffer12,
buffer14,
        buffer16, buffer18, buffer19 , buffer20, buffer22, buffer24, buffer26, buffer28,
buffer30,
        buffer32, buffer34, buffer36, buffer38, buffer40, buffer44, buffer48, buffer52,
buffer56, buffer60,
        buffer64, buffer68, buffer72, buffer76, buffer80, buffer88, buffer96, buffer104,
buffer112, buffer120,
        buffer128, buffer136, buffer144, buffer152;
private List<short[]> bufferList;

public static final String EXTRA_MESSAGE = "com.example.myfirstapp.MESSAGE";

@Override
protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
    super.onCreate(savedInstanceState);
    setContentView(R.layout.activity_main);
    ActivityCompat.requestPermissions(this, new
String[]{Manifest.permission.RECORD_AUDIO}, PackageManager.PERMISSION_GRANTED);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ให้มีเหตุที่เบาะแสเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

textViewStatus = findViewById(R.id.textViewStatus);
textView = findViewById(R.id.textView);

```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

bufferList = new ArrayList<>();
editText2 = findViewById(R.id.editText2);
editText = findViewById(R.id.editText);
editText3 = findViewById(R.id.editText3);
editText4 = findViewById(R.id.editText4);
editText5 = findViewById(R.id.editText5);
    editText6 = findViewById(R.id.editText6);
editText7 = findViewById(R.id.editText7);
    thread = new Thread(new Runnable() {
        @Override
        public void run() {
            threadLoop();
        }
    });
}

public void buttonStart(View view) {
    G125 = Short.parseShort(editText2.getText().toString());
    G250 = Short.parseShort(editText.getText().toString());
    G500 = Short.parseShort(editText3.getText().toString());
    G1K = Short.parseShort(editText4.getText().toString());
    G2K = Short.parseShort(editText5.getText().toString());
    G4K = Short.parseShort(editText6.getText().toString());
    G8K = Short.parseShort(editText7.getText().toString());

    G1 = (short)((((G250-G125)/(250-125))*200) + G125);
    G2 = (short)((((G1K-G500)/(1000-500))*640) + G500);
    G3 = (short)((((G2K-G1K)/(2000-1000))*1360) + G1K);
    G4 = (short)((((G4K-G2K)/(4000-2000))*2720) + G2K);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ไปยังผู้อื่น และต้องยังต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

G5 = (short)(((G8K-G4K)/(8000-4000))*5360) + G4K);
G6 = (short)(((G8K-G4K)/(8000-4000))*6560) + G4K);
G7 = (short)(((G8K-G4K)/(8000-4000))*7360) + G4K);
G8 = (short)(((G8K-G4K)/(8000-4000))*7840) + G4K);

g1 = (short)(Math.pow(10,G1/20));
g2 = (short)(Math.pow(10,G2/20));
g3 = (short)(Math.pow(10,G3/20));
g4 = (short)(Math.pow(10,G4/20));
g5 = (short)(Math.pow(10,G5/20));
g6 = (short)(Math.pow(10,G6/20));
g7 = (short)(Math.pow(10,G7/20));
g8 = (short)(Math.pow(10,G8/20));
isActive = true;
textViewStatus.setText("Active");
thread.start();
}
private void threadLoop() {

    int intRecordSampleRate =
    AudioTrack.getNativeOutputSampleRate(AudioManager.STREAM_MUSIC);

    int bufferSize = AudioRecord.getMinBufferSize(intRecordSampleRate,
    AudioFormat.CHANNEL_IN_MONO
        , AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT);

    short audioData = new short[bufferSize];

    audioRecord = new AudioRecord(MediaRecorder.AudioSource.MIC
        , intRecordSampleRate
        , AudioFormat.CHANNEL_IN_STEREO

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

        , AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT
        , intBufferSize);

audioTrack = new AudioTrack(AudioManager.STREAM_MUSIC
        , intRecordSampleRate
        , AudioFormat.CHANNEL_IN_STEREO
        , AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT
        , intBufferSize
        , AudioTrack.MODE_STREAM);

audioTrack.setPlaybackRate(intRecordSampleRate);

audioRecord.startRecording();
audioTrack.play();

while (isActive) {
    audioRecord.read(shortAudioData, 0, shortAudioData.length);
    int N = intRecordSampleRate/8;
    Log.d("number", "N = " + String.valueOf(N));
    Log.d("number", "intRecordSampleRate = " + String.valueOf(intRecordSampleRate));
    Log.d("number", "shortAudioData.length = " + String.valueOf(shortAudioData.length));

    int slotTime = 153;
    bufferList.add(0, shortAudioData.clone());
    if (bufferList.size() == slotTime + 1) {
        bufferList.remove(slotTime);
    }
    if (bufferList.size() == slotTime) {
        buffer2 = bufferList.get(2);
        buffer4 = bufferList.get(4);
        buffer6 = bufferList.get(6);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
buffer8 = bufferList.get(8);  
buffer9 = bufferList.get(9);  
buffer10 = bufferList.get(10);  
buffer12 = bufferList.get(12);  
buffer14 = bufferList.get(14);  
buffer16 = bufferList.get(16);  
buffer18 = bufferList.get(18);  
buffer19 = bufferList.get(19);  
buffer20 = bufferList.get(20);  
buffer22 = bufferList.get(22);  
buffer24 = bufferList.get(24);  
buffer26 = bufferList.get(26);  
buffer28 = bufferList.get(28);  
buffer30 = bufferList.get(30);  
buffer32 = bufferList.get(32);  
buffer34 = bufferList.get(34);  
buffer36 = bufferList.get(36);  
buffer38 = bufferList.get(38);  
buffer40 = bufferList.get(40);  
buffer44 = bufferList.get(44);  
buffer48 = bufferList.get(48);  
buffer52 = bufferList.get(52);  
buffer56 = bufferList.get(56);  
buffer60 = bufferList.get(60);  
buffer64 = bufferList.get(64);  
buffer68 = bufferList.get(68);  
buffer72 = bufferList.get(72);  
buffer76 = bufferList.get(76);  
buffer80 = bufferList.get(80);  
buffer88 = bufferList.get(88);  
buffer96 = bufferList.get(96);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

buffer104 = bufferList.get(104);
buffer112 = bufferList.get(112);
buffer120 = bufferList.get(120);
buffer128 = bufferList.get(128);
buffer136 = bufferList.get(136);
buffer144 = bufferList.get(144);
buffer152 = bufferList.get(152);
}

```

```

double A1 = 0.0011;
double A2 = -0.0071;
double A3 = 0.0262;
double A4 = -0.078;
double A5 = 0.3078;
double A6 = 0.5;
double A7 = -0.3078;
double A8 = 0.078;
double A9 = -0.0262;
double A10 = 0.0071;
double A11 = -0.0011;

```

```

double B1=-0.000216;
double B2=0.000793;
double B3=-0.0021;
double B4=0.0047;
double B5=-0.0092;
double B6=0.0168;
double B7=-0.0292;
double B8=0.051;

```

```

double B9=-0.098;
double B10=0.3155;
double B11=0.5;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากพบที่ผิดให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

double B12=-0.3155;
double B13=0.098;
double B14=-0.051;
double B15=0.0292;
double B16=-0.0168;
double B17=0.0092;
double B18=-0.0047;
double B19=0.0021;
double B20=-0.000793;
double B21=0.000216;

if (bufferList.size() == slotTime) {
    for (int i = 0; i < shortAudioData.length; i++) {
        H = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer2[i] + A3 * buffer4[i] +
A4 * buffer6[i] + A5 * buffer8[i] + A6 * buffer9[i]
        + A5 * buffer10[i] + A4 * buffer12[i] + A3 * buffer14[i] + A2 *
buffer16[i] + A1 * buffer18[i]);
        H2 = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer4[i] + A3 * buffer8[i] +
A4 * buffer12[i] + A5 * buffer16[i] + A6 * buffer18[i]
        + A5 * buffer20[i] + A4 * buffer24[i] + A3 * buffer28[i] + A2 *
buffer32[i] + A1 * buffer36[i]);
        H4 = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer8[i] + A3 * buffer16[i] +
A4 * buffer24[i] + A5 * buffer32[i] + A6 * buffer36[i]
        + A5 * buffer40[i] + A4 * buffer48[i] + A3 * buffer56[i] + A2 *
buffer64[i] + A1 * buffer72[i]);
        H8 = (short) (A1 * shortAudioData[i] + A2 * buffer16[i] + A3 * buffer32[i]
+ A4 * buffer48[i] + A5 * buffer64[i] + A6 * buffer72[i]
        + A5 * buffer80[i] + A4 * buffer96[i] + A3 * buffer112[i] + A2 *
buffer128[i] + A1 * buffer144[i]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{aligned}
 \text{HC} = & (\text{short}) (A11 * \text{shortAudioData}[i] + A10 * \text{buffer2}[i] + A9 * \text{buffer4}[i] \\
 & + A8 * \text{buffer6}[i] + A7 * \text{buffer8}[i] + A6 * \text{buffer9}[i] \\
 & + A7 * \text{buffer10}[i] + A8 * \text{buffer12}[i] + A9 * \text{buffer14}[i] + A10 * \\
 & \text{buffer16}[i] + A11 * \text{buffer18}[i]);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{F} = & (\text{short}) (B1 * \text{shortAudioData}[i] + B2 * \text{buffer2}[i] + B3 * \text{buffer4}[i] + B4 \\
 & * \text{buffer6}[i] + B5 * \text{buffer8}[i] + B6 * \text{buffer10}[i] \\
 & + B7 * \text{buffer12}[i] + B8 * \text{buffer14}[i] + B9 * \text{buffer16}[i] + B10 * \\
 & \text{buffer18}[i] + B11 * \text{buffer19}[i] + B10 * \text{buffer20}[i] \\
 & + B9 * \text{buffer22}[i] + B8 * \text{buffer24}[i] + B7 * \text{buffer26}[i] + B6 * \\
 & \text{buffer28}[i] + B5 * \text{buffer30}[i] + B4 * \text{buffer32}[i] \\
 & + B3 * \text{buffer34}[i] + B2 * \text{buffer36}[i] + B1 * \text{buffer38}[i]);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{F2} = & (\text{short}) (B1 * \text{shortAudioData}[i] + B2 * \text{buffer4}[i] + B3 * \text{buffer8}[i] + \\
 & B4 * \text{buffer12}[i] + B5 * \text{buffer16}[i] + B6 * \text{buffer20}[i] \\
 & + B7 * \text{buffer24}[i] + B8 * \text{buffer28}[i] + B9 * \text{buffer32}[i] + B10 * \\
 & \text{buffer36}[i] + B11 * \text{buffer38}[i] + B10 * \text{buffer40}[i] \\
 & + B9 * \text{buffer44}[i] + B8 * \text{buffer48}[i] + B7 * \text{buffer52}[i] + B6 * \\
 & \text{buffer56}[i] + B5 * \text{buffer60}[i] + B4 * \text{buffer64}[i] \\
 & + B3 * \text{buffer68}[i] + B2 * \text{buffer72}[i] + B1 * \text{buffer76}[i]);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{F4} = & (\text{short}) (B1 * \text{shortAudioData}[i] + B2 * \text{buffer8}[i] + B3 * \text{buffer16}[i] + \\
 & B4 * \text{buffer24}[i] + B5 * \text{buffer32}[i] + B6 * \text{buffer40}[i] \\
 & + B7 * \text{buffer48}[i] + B8 * \text{buffer56}[i] + B9 * \text{buffer64}[i] + B10 * \\
 & \text{buffer72}[i] + B11 * \text{buffer76}[i] + B10 * \text{buffer80}[i] \\
 & + B9 * \text{buffer88}[i] + B8 * \text{buffer96}[i] + B7 * \text{buffer104}[i] + B6 * \\
 & \text{buffer112}[i] + B5 * \text{buffer120}[i] + B4 * \text{buffer128}[i] \\
 & + B3 * \text{buffer136}[i] + B2 * \text{buffer144}[i] + B1 * \text{buffer152}[i]);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{FC} = & (\text{short}) (B21 * \text{shortAudioData}[i] + B20 * \text{buffer2}[i] + B19 * \text{buffer4}[i] \\
 & + B18 * \text{buffer6}[i] + B17 * \text{buffer8}[i] + B16 * \text{buffer10}[i]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + B15 * \text{buffer12}[i] + B14 * \text{buffer14}[i] + B13 * \text{buffer16}[i] + B12 * \\
 & \text{buffer18}[i] + B11 * \text{buffer19}[i] + B12 * \text{buffer20}[i] \\
 & + B13 * \text{buffer22}[i] + B14 * \text{buffer24}[i] + B15 * \text{buffer26}[i] + B16 *
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่สู่สาธารณะ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นทำมาเพื่อเผยแพร่โดยเจตนา และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

buffer28[i] + B17 * buffer30[i] + B18 * buffer32[i]
        + B19 * buffer34[i] + B20 * buffer36[i] + B21 * buffer38[i]);

P1 = (short)(H8*F4*F2*F);
P2 = (short)(H4*F2*F);
P3 = (short)(H2*F);
P4 = H;
P5 = HC;
P6 = (short)(H2*FC);
P7 = (short)(H4*F2*FC);
P8 = (short)(H8*F4*F2*FC);

//
b1= (short)(Math.abs(P1));
b2= (short)(Math.abs(P2)-Math.abs(P1));
b3= (short)(Math.abs(P3)-Math.abs(P2));
b4= (short)(Math.abs(P4)-Math.abs(P3));
b5= (short)(Math.abs(P5)-Math.abs(P6));
b6= (short)(Math.abs(P6)-Math.abs(P7));
b7= (short)(Math.abs(P7)-Math.abs(P8));
b8= (short)(Math.abs(P8));

BG = (short)((g1*b1+g2*b2+g3*b3+g4*b4+g5*b5+g6*b6+g7*b7+g8*b8)/100);

shortAudioData[i] = BG;
    if (shortAudioData[i] > 0) {
        shortAudioData[i] = (short) Math.min(shortAudioData[i],
Short.MAX_VALUE);
    } else {
        shortAudioData[i] = (short) Math.max(shortAudioData[i],
Short.MIN_VALUE);
    }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

    }
}

    audioTrack.write(shortAudioData, 0, shortAudioData.length);
}

}

};

```

### ส่วน activity\_main (layout)

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout
    xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
    xmlns:app="http://schemas.android.com/apk/res-auto"
    xmlns:tools="http://schemas.android.com/tools"
    android:layout_width="match_parent"
    android:layout_height="match_parent"
    android:background="#00BCD4"
    tools:context=".MainActivity">

```

```

<EditText
    android:id="@+id/editText3"
    android:layout_width="81dp"
    android:layout_height="37dp"
    android:layout_marginStart="28dp"
    android:layout_marginTop="8dp"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#FFFFFFF"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ผู้ที่มีเหตุอันสมควร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:textSize="16dp"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView21"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/editText" />

```

```
<EditText
```

```

    android:id="@+id/editText4"
    android:layout_width="81dp"
    android:layout_height="37dp"
    android:layout_marginStart="28dp"
    android:layout_marginTop="8dp"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#FFFFFF"
    android:textSize="16dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView22"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/editText3" />

```

```
<EditText
```

```

    android:id="@+id/editText5"
    android:layout_width="81dp"
    android:layout_height="37dp"
    android:layout_marginStart="28dp"
    android:layout_marginTop="12dp"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#FFFFFF"
    android:textSize="16dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView23"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/editText4" />

```

```
<EditText
```

```

    android:id="@+id/editText6"
    android:layout_width="81dp"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุที่เห็นสมควร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:layout_height="37dp"
android:layout_marginStart="28dp"
android:layout_marginTop="8dp"
android:textAlignment="center"
android:textColor="#FFFFFF"
android:textSize="16dp"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView24"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/editText5" />

```

<EditText

```

android:id="@+id/editText7"
android:layout_width="81dp"
android:layout_height="37dp"
android:layout_marginStart="28dp"
android:layout_marginTop="8dp"
android:textAlignment="center"
android:textColor="#FFFFFF"
android:textSize="16dp"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView25"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/editText6" />

```

<TextView

```

android:id="@+id/textView23"
android:layout_width="27dp"
android:layout_height="31dp"
android:layout_marginStart="20dp"
android:layout_marginTop="14dp"
android:text="."

```

```

android:textColor="#ffffff"
android:textSize="18dp"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView17"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView22" />
```

```
<TextView
    android:id="@+id/textView24"
    android:layout_width="27dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="20dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text=":"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView18"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView23" />
```

```
<TextView
    android:id="@+id/textView25"
    android:layout_width="27dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="20dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text=":"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView19"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView24" />
```

```
<TextView
    android:id="@+id/textView19"
    android:layout_width="63dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="100dp"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีข้อยกเว้นที่แจ้งเอาไว้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:layout_marginTop="14dp"
android:text="8 kHz"
android:textColor="#ffffff"
android:textColorHighlight="#ffffff"
android:textSize="18dp"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView18" />

```

```
<Button
```

```

android:id="@+id/button"
android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_marginStart="164dp"
android:layout_marginTop="520dp"
android:backgroundTint="#4CAF50"
android:onClick="buttonStart"
android:text="start"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

```
<TextView
```

```

android:id="@+id/textViewStatus"
android:layout_width="wrap_content"
android:layout_height="wrap_content"
android:layout_marginStart="184dp"
android:layout_marginTop="12dp"
android:text="status"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"

```

```

app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/button" />

```

```
<TextView
```

```

android:id="@+id/textView3"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:layout_width="92dp"
android:layout_height="29dp"
android:layout_marginStart="88dp"
android:layout_marginTop="80dp"
android:text="FREQUENCY"
android:textSize="16dp"
android:textColor="#ffffff"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView4"
    android:layout_width="95dp"
    android:layout_height="25dp"
    android:layout_marginStart="50dp"
    android:layout_marginTop="80dp"
    android:text="GAIN (dBHL)"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="16dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView3"
    app:layout_constraintTop_toTopOf="parent" />

```

```

<EditText
    android:id="@+id/editText2"
    android:layout_width="81dp"
    android:layout_height="37dp"
    android:layout_marginStart="28dp"
    android:layout_marginTop="23dp"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#FFFFFF"
    android:textSize="16dp"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิได้มีการติดต่อขอหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView13"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView4" />

```

```

<EditText
    android:id="@+id/editText"
    android:layout_width="81dp"
    android:layout_height="37dp"
    android:layout_marginStart="28dp"
    android:layout_marginTop="8dp"
    android:textAlignment="center"
    android:textColor="#FFFFFF"
    android:textSize="16dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView20"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/editText2" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView5"
    android:layout_width="63dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="96dp"
    android:layout_marginTop="24dp"
    android:text="125 Hz"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    android:textColorHighlight="#ffffff"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView3" />

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุพิเศษข้อยกเว้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:layout_height="31dp"
android:layout_marginStart="96dp"
android:layout_marginTop="14dp"
android:text="250 Hz"
android:textColor="#ffffff"
android:textColorHighlight="#ffffff"
android:textSize="18dp"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView5" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView15"
    android:layout_width="63dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="96dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text="500 Hz"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textColorHighlight="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView14" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView16"
    android:layout_width="63dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="100dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text="1 kHz"
    android:textColor="#ffffff"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ที่มีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:textColorHighlight="#ffffff"
android:textSize="18dp"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView15" />

```

```
<TextView
```

```

android:id="@+id/textView17"
android:layout_width="63dp"
android:layout_height="31dp"
android:layout_marginStart="100dp"
android:layout_marginTop="14dp"
android:text="2 kHz"
android:textColor="#ffffff"
android:textColorHighlight="#ffffff"
android:textSize="18dp"
app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView16" />

```

```
<TextView
```

```

android:id="@+id/textView18"
android:layout_width="63dp"
android:layout_height="31dp"
android:layout_marginStart="100dp"
android:layout_marginTop="14dp"
android:text="4 kHz"
android:textColor="#ffffff"
android:textColorHighlight="#ffffff"
android:textSize="18dp"

```

```

app:layout_constraintStart_toStartOf="parent"

```

```

app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView17" />

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ผู้ที่มีเหตุพิเศษขออนุญาต และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

<TextView
    android:id="@+id/textView13"
    android:layout_width="27dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="24dp"
    android:layout_marginTop="24dp"
    android:text=":"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView5"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView3" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView20"
    android:layout_width="27dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="24dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text=":"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView14"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView13" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView21"
    android:layout_width="27dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="24dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text=":"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่กรณีที่มีการขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:textColor="#ffffff"
android:textSize="18dp"
app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView15"
app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView20" />

```

```

<TextView
    android:id="@+id/textView22"
    android:layout_width="27dp"
    android:layout_height="31dp"
    android:layout_marginStart="20dp"
    android:layout_marginTop="14dp"
    android:text=":"
    android:textColor="#ffffff"
    android:textSize="18dp"
    app:layout_constraintStart_toEndOf="@+id/textView16"
    app:layout_constraintTop_toBottomOf="@+id/textView21" />
</androidx.constraintlayout.widget.ConstraintLayout>

```

### ส่วน Manifest

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<manifest xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
    xmlns:tools="http://schemas.android.com/tools"
    package="com.example.realtimesignal">

    <uses-permission android:name="android.permission.RECORD_AUDIO" />
    <uses-permission android:name="android.permission.INTERNET" />

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ย้ำห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

android:icon="@mipmap/ic_launcher"
android:label="Hearing Aids"
tools:replace="android:label"
android:roundIcon="@mipmap/ic_launcher_round"
android:supportsRtl="true"
android:theme="@style/AppTheme" >
<activity android:name=".login" >
    <meta-data
        android:name="com.facebook.sdk.ApplicationId"
        android:value="@string/facebook_app_id" />
</activity>
<activity
    android:name="com.facebook.FacebookActivity"
    android:configChanges="keyboard|keyboardHidden|screenLayout|screenSize|orientation"
    android:label="@string/app_name" />
<activity
    android:name="com.facebook.CustomTabActivity"
    android:exported="true" >
    <intent-filter>
        <action android:name="android.intent.action.VIEW" />
        <category android:name="android.intent.category.DEFAULT" />
        <category android:name="android.intent.category.BROWSABLE" />
        <data android:scheme="@string/fb_login_protocol_scheme" />
    </intent-filter>
</activity>

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่ได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

<activity android:name=".MainActivity" >

    <intent-filter>
        <action android:name="android.intent.action.MAIN" />

        <category android:name="android.intent.category.LAUNCHER" />
    </intent-filter>

</activity>
</application>
</manifest>

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ค

Experimental Hand Book of Digital Signal Processing System

Using STM32F769I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



# Experimental Hand Book of Digital Signal Processing System Using STM32F769I



โดย

นายรัฐนวกานต์ กาญจนสิน 60010525

นางสาวปฏิมากร พวงมณี 60010566

นางสาวพิมพ์ชนก กิจเจริญค้า 60010717

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโทรคมนาคม ปีการศึกษา 2563

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## คำนำ

คู่มือเล่มนี้จัดทำขึ้นเนื่องจากเนื้อหาที่ใช้สำหรับการเรียนการสอนในวิชาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหรือ Digital Signal Processing มีรายละเอียดที่มากและมีความซับซ้อน ทำให้นอกจากการสอบวัดผลแล้ว การนำความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาวิชานี้ไปประยุกต์ใช้งานจึงเป็นเรื่องที่ยากและไม่ชัดเจน คู่มือนี้จึงให้ความสนใจกับการแก้ไขปัญหาข้างต้น สามารถช่วยให้เห็นภาพการใช้งานจริงได้ชัดเจนยิ่งขึ้นและนำไปพัฒนาต่อเป็นแอปพลิเคชันที่สามารถใช้ได้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่เรื่องของ Digital Filter เป็นหลัก โดยการนำไปประยุกต์ใช้งานในส่วนการใช้งานฮาร์ดแวร์เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด STM32F769I นำสิ่งที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาสร้างเป็นชิ้นงานเก็บไว้เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนต่อไป

ทั้งนี้ เนื้อหาได้รวบรวมมาทั้งหมด ขอขอบพระคุณอาจารย์ผศ.อัครพล ตรีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ศรวิรัตน์ ชิวปรีชา ที่ให้คำแนะนำแนะแนวทางการแก้ไขและข้อบกพร่องต่าง ๆ

ขอขอบคุณ รุ่งพี ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทำปริญญานิพนธ์

ขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูงที่คอยช่วยเหลือและให้ความรู้เพิ่มเติมและขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนที่เป็นกำลังใจสำคัญให้แก่ผู้จัดทำให้สามารถทำงานได้ลุล่วงไปด้วยดี

นายรัฐนวกานต์ กาญจนสิน  
นางสาวปฎิมากร พวงมณี  
นางสาวพิมพ์ชนก กิจเจริญคำ

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 บอร์ด STM32F769I	1
	1.2 การติดตั้ง support package ในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานร่วมกับบอร์ด STM32F769I	7
บทที่ 2	ทดสอบการใช้งานบอร์ดโดยเบื้องต้น (BYPASS SIGNAL) ขั้นตอนการทดสอบบอร์ด	10
บทที่ 3	FIR Implement	
	Kaiser window function	35
บทที่ 4	IIR Implement	
	Poles-Zeros Placement	98
บทที่ 5	Applications of digital filters	
	5.1 การประยุกต์ใช้งาน FIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี windowing	155
	5.2 การออกแบบ Graphic Equalizer	157
	5.3 ผลการทดสอบการสร้าง Graphic Equalizer	178
	5.4 การประยุกต์ใช้งาน IIR Filter	180
	5.5 ผลการทดสอบการสร้าง Parametric Equalizer	243
บรรณานุกรม		245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บอร์ด STM32F769I

32F769IDISCOVERY Discovery kit เป็นแพลตฟอร์มสาธิต ซึ่งได้รับการพัฒนาจนสมบูรณ์แบบสำหรับใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F769NIH6 ที่ใช้คอร์ STMicroelectronics Arm®Cortex®-M7 โดยชุด Discovery นี้ประกอบด้วย I2C ซีตั่ว, SPI ทกตัว พร้อมด้วยมัลติเพล็กซ์ I2S 2xSDMMC แบบซิมเพล็กซ์สามตัว, USART ซีตั่ว, UART ซีตั่ว, บัส CAN สามตัว, ADC 12 บิตสามตัว, DAC 12 บิต สองตัว, SAI สองตัว, อินเทอร์เฟซโมดูลกล้องดิจิทัล 8 ถึง 14 บิต, SRAM ภายใน 512 + 4-Kbyte และหน่วยความจำแฟลช 2 Mbyte, USB HS OTG และ USB FS OTG, Ethernet MAC, อินเทอร์เฟซ FMC, อินเทอร์เฟซ Quad-SPI อีกทั้งยังรองรับการดีบั๊ก SWD

ชุด Discovery มีอุปกรณ์ และฟังก์ชันที่จำเป็นเพื่อความสะดวกรวดเร็วต่อการใช้งาน อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกสบายแก่ผู้ใช้ในด้านของการนำชุด Discovery ไปใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน คุณลักษณะของฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่ในชุด 32F769IDISCOVERY Discovery สำหรับรุ่น STM32F769I-DISC1 นั้นแสดงดังรูปที่ 1.1 และ 1.2



รูปที่ 1.1 STM32F769I – DISC1 (top view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 1.2 STM32F769I – DISC1 (bottom view)

### 1.1.1 คุณสมบัติ

- 1) บนบอร์ดมีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ STM32F769NIH6 Arm® (a) ซึ่งมีหน่วยความจำแฟลช 2 เมกะไบต์และ RAM 512 + 16 + 4 Kbytes ในแพ็คเกจ BGA216
- 2) บนบอร์ด ST-LINK / V2-1 รองรับการตั้งค่า USB แบบ reenumeration
- 3) ฟังก์ชัน USB ST-LINK : พอร์ตเสมือนแบบ COM, ที่เก็บข้อมูลขนาดใหญ่ และพอร์ต
- 4) อุปกรณ์เสริมสำหรับการแสดงผล : DSI LCD, อะแดปเตอร์ HDMI และอะแดปเตอร์
- 5) ตัวแปลงสัญญาณเสียง SAI
- 6) แจ็คเสียงสองสาย แจ็คสายหนึ่งสำหรับอินพุตและอีกสายหนึ่งสำหรับเอาต์พุต
- 7) เอาต์พุตลำโพงสเตอริโอ
- 8) ไมโครโฟน ST-MEMS สี่ตัวบนอินพุต DFSDM
- 9) อินพุตและเอาต์พุต SPDIF RCA สองตัว
- 10) ปุ่มกดสองปุ่ม (user และ reset)
- 11) หน่วยความจำแฟลช 512-Mbit Quad-SPI
- 12) SDRAM 128-Mbit
- 13) ขั้วต่อสำหรับการ์ด microSD™

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือจัดจำหน่ายในรูปแบบอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

16) ขั้วต่ออีเทอร์เน็ตที่ตรงตามมาตรฐาน IEEE-802.3-2002

17) บอร์ดมีตัวเลือกสำหรับแหล่งจ่ายไฟห้าตัว คือ

- ST LINK/V2-1
- ขั้วต่อ USB HS
- 5 V จาก RJ45 (Power Over Ethernet)
- 5 V จาก Arduino <sup>TM</sup>หรือขั้วต่อภายนอก
- USB charger

18) Power Over Ethernet ตามมาตรฐาน IEEE 802.3af (Powered Device, 48 V ถึง 5 V, 3 W)

19) แหล่งจ่ายไฟเอาต์พุตสำหรับการใช้งานภายนอกขนาด 3.3 V หรือ 5 V

20) ขั้วต่อ Arduino <sup>TM</sup> Uno V3

21) ซอฟต์แวร์ฟรีที่ครอบคลุมตัวอย่างการใช้งานหลายรูปแบบ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแพ็คเกจ STM32Cube

22) รองรับการพัฒนาแบบบูรณาการอันหลากหลาย

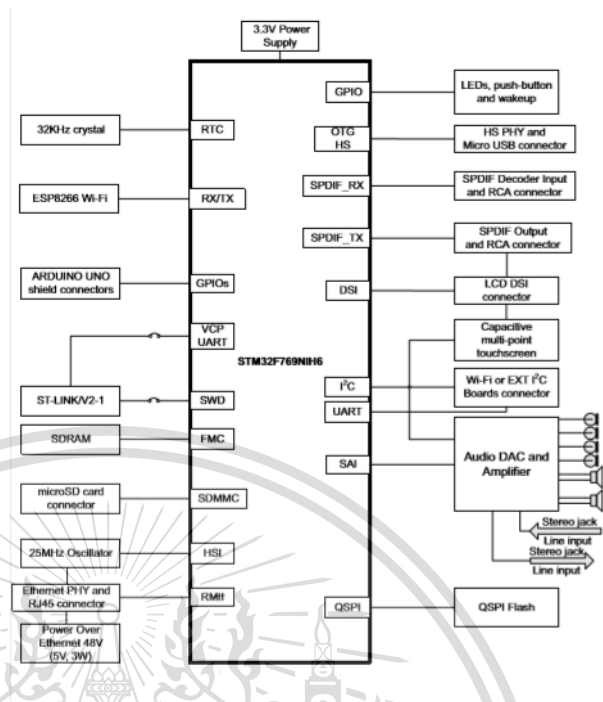
### 1.1.2 เค้าโครงฮาร์ดแวร์และการกำหนดค่า

บอร์ด STM32F769IDISCOVERY Discovery ได้รับการออกแบบโดยใช้ STM32F769NIH6 แผนภาพบล็อกฮาร์ดแวร์ ในรูปที่ 1.3 แสดงการเชื่อมต่อระหว่าง STM32F769NIH6 และอุปกรณ์ต่อพ่วง (SDRAM, หน่วยความจำแฟลช Quad-SPI, ขั้วต่อ LCD DSI, ขั้วต่อ USB OTG, USART, อีเธอร์เน็ต, เสียง, SPDIF RCA in, SPDIF RCA out, microSD <sup>TM</sup>การ์ด Arduino <sup>TM</sup> Uno shields และ ST-LINK ในตัว) ในรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 แสดงภาพโครงสร้างที่ช่วยผู้ใช้ในการค้นหาคุณสมบัติเหล่านี้บนบอร์ด Discovery ส่วนในรูปที่ 1.6 แสดงขนาดเชิงกลของบอร์ด Discovery

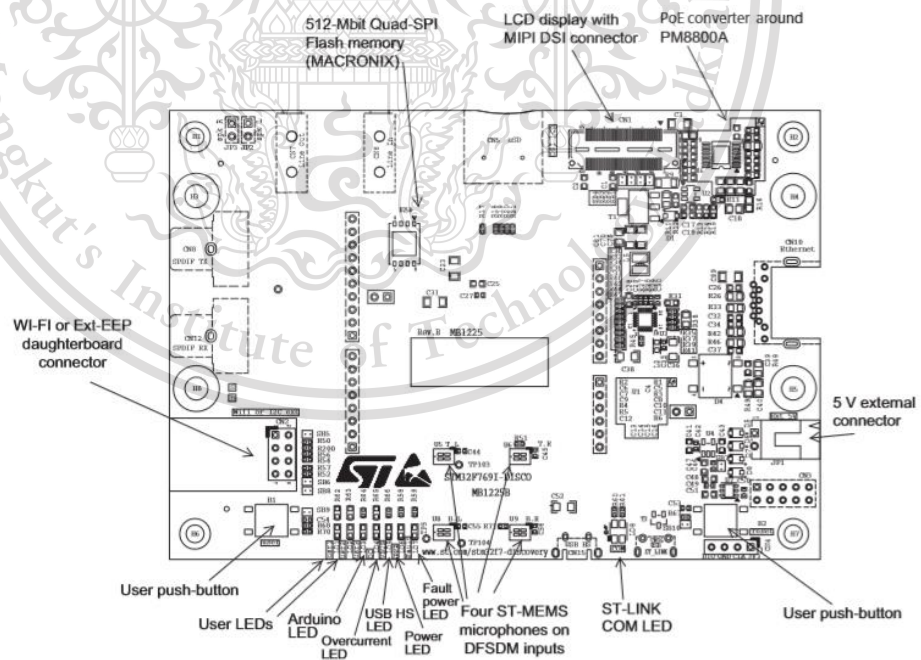
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 1.3 แผนภาพบล็อกฮาร์ดแวร์



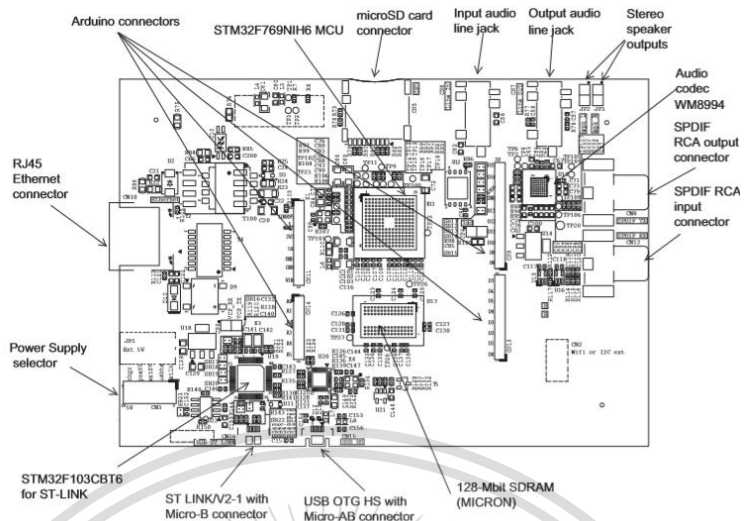
รูปที่ 1.4 32F769IDISCOVERY top layout

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 1.4 32F769IDISCOVERY top layout ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

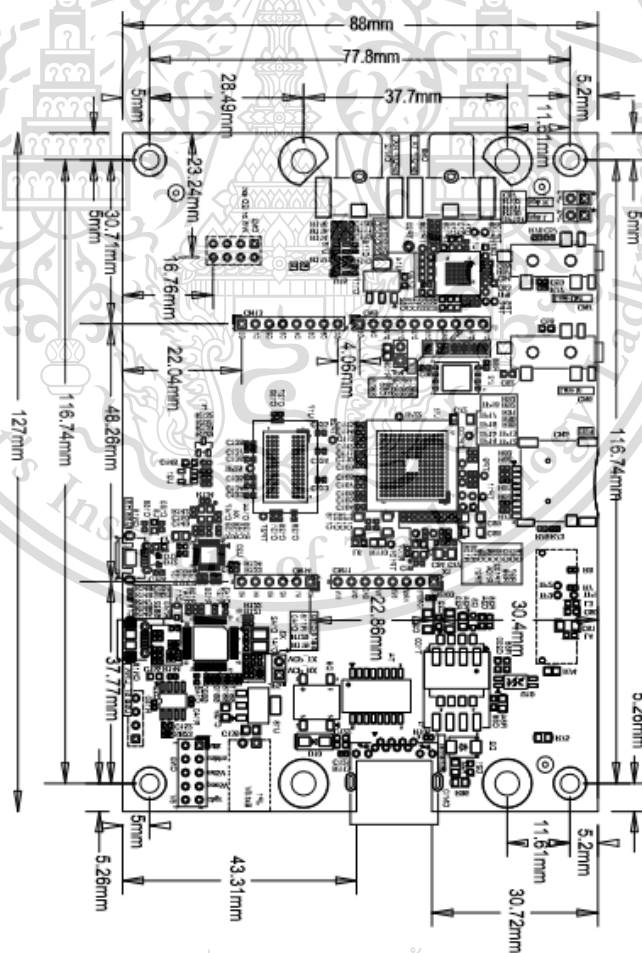
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 1.5 32F769IDISCOVERY bottom layout



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 1.6 32F769IDISCOVERY เซิงกล

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.1.3 ST-LINK/ V2-1 ในตัว

ST-LINK/V2-1 programming และเครื่องมือสำหรับการดีบั๊กถูกรวมอยู่ในส่วนของบอร์ด 32F769DISCOVER โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบเวอร์ชันระหว่าง ST-LINK/V2-1 กับ ST-LINK/V2 พบว่า ST-LINK/V2-1 มีคุณสมบัติใหม่ที่เพิ่มเติมมาดังนี้

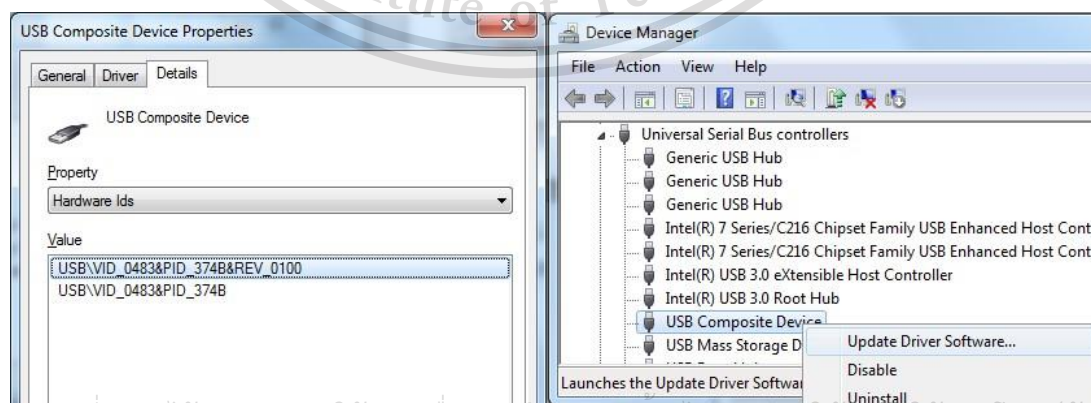
- 1) การแจ้งเตือนซอฟต์แวร์ USB ใหม่
- 2) มีพอร์ต Virtual COM บน USB
- 3) มีพื้นที่สำหรับจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่บน USB
- 4) มีการจัดการพลังงานสำหรับ USB เมื่อตรวจพบว่า USB มีพลังงานมากกว่า 100 mA
- 5) อินเทอร์เฟซ SWIM
- 6) แรงดันไฟฟ้าของแอปพลิเคชันต่ำกว่า 3 V สำหรับข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติการดีบั๊กและการเขียนโปรแกรมที่พบบ่อยสำหรับทั้งเวอร์ชัน V2 และ V2-1 โปรดดูที่ ST-LINK/ V2 in-วงจรดีบั๊กเกอร์ โปรแกรมเมอร์สำหรับคู่มือผู้ใช้ STM8 และ STM32 (UM1075)

#### 1.1.3.1 Driver

ST-LINK / V2-1 ต้องใช้ไดรเวอร์ USB รูปแบบเฉพาะ โดยสำหรับ Windows XP, 7 และ 8 สามารถดาวน์โหลดไดรเวอร์เฉพาะนี้ได้จากเว็บไซต์ [www.st.com](http://www.st.com)

ในกรณีที่บอร์ด 32F769DISCOVERY เชื่อมต่อกับอุปกรณ์พีซีก่อนที่จะมีการติดตั้งไดรเวอร์ 32F769DISCOVERY อินเทอร์เฟซบางส่วนอาจขึ้นสถานะว่า “unknown” ใน device manager ของอุปกรณ์พีซี ในกรณีนี้ผู้ใช้ต้องทำการติดตั้งไฟล์ไดรเวอร์ และอัปเดตไดรเวอร์ของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อจากหน้าต่าง device manager

หมายเหตุ ควรใช้แฮนด์เล็ “USB Composite Device” เพื่อการ recovery อย่างเต็มรูปแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา รูปที่ 1.7 USB Composite Device

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.1.3.2 การอัปเดตเฟิร์มแวร์ ST-LINK/ V2-1

ST-LINK / V2-1 มีกลไกการอัปเดตเฟิร์มแวร์สำหรับการอัปเดตแบบ in-situ ผ่านพอร์ต USB เนื่องจากเฟิร์มแวร์อาจมีการพัฒนาในระหว่างอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ST-LINK / V2-1 (ยกตัวอย่างเช่น มีฟังก์ชันใหม่, มีการแก้ไข bug และมีการรองรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่ เป็นต้น) ดังนั้นผู้ใช้งานจึงควรตรวจสอบรายละเอียดเพิ่มเติมจากเว็บไซต์ [www.st.com](http://www.st.com) ก่อนเริ่มต้นใช้งานบอร์ด 32F769I DISCOVERY รวมถึงคอยติดตามข้อมูลตรงส่วนนี้เป็นระยะ เพื่อคอยทำการอัปเดตเฟิร์มแวร์ให้เป็นเวอร์ชันล่าสุดอยู่เสมอ

#### 1.1.4 Connectors

##### 1) Audio stereo speakers JP2 and JP3

พอร์ตเอาต์พุตเสียงสเตอริโอ JP2 และ JP3 มีไว้สำหรับรองรับลำโพงสเตอริโอ (ซ้ายและขวาตามลำดับ)

##### 2) Audio line output connector jack CN7

แจ๊คสำหรับเอาต์พุตเสียงสเตอริโอ CN7 ขนาด 3.5 mm มีไว้สำหรับเชื่อมต่อกับหูฟัง

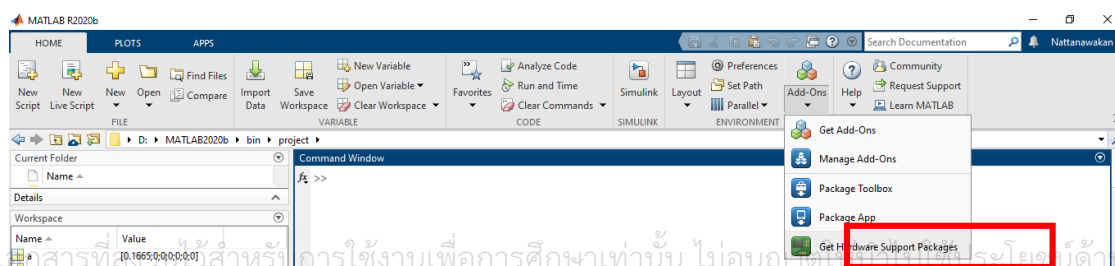
##### 3) Audio line input connector jack CN6

แจ๊คสำหรับอินพุตเสียงสเตอริโอ CN6 ขนาด 3.5 mm มีไว้สำหรับรองรับช่องสัญญาณเสียงอินพุต

## 1.2 การติดตั้ง support package ในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ทำงานร่วมกับบอร์ด STM32F769I

ทำการติดตั้งเพื่อให้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB สามารถ build วงจรต่าง ๆ ลงในบอร์ด STM32F769I ได้ โดย MATLAB ต้องเป็นเวอร์ชัน R2018a ขึ้นไป และต้องใช้สาย micro USB data cable ร่วมด้วย ขั้นตอนการติดตั้งมีดังนี้

### 1) เลือก Add-Ons บน Menu tab ไปที่ Get Hardware Support Packages แสดงดังรูปที่ 1.7

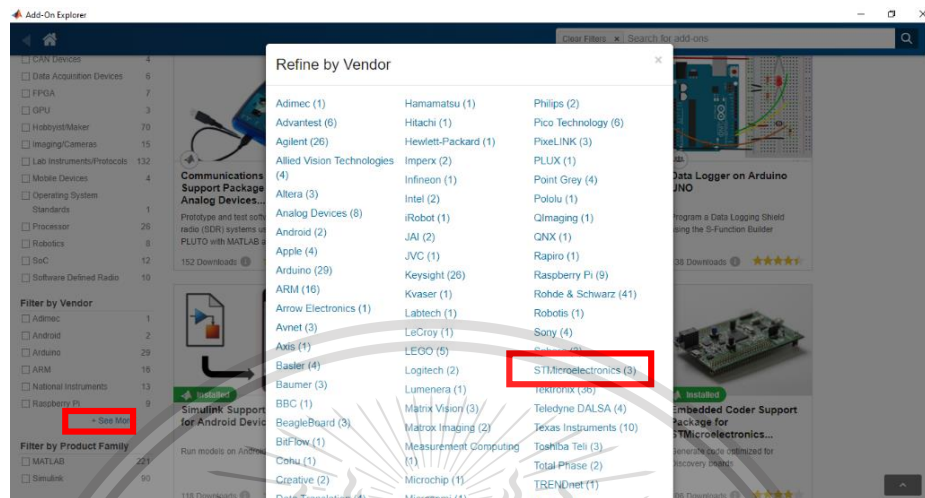


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงในลักษณะใดๆทั้งสิ้น หากมีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

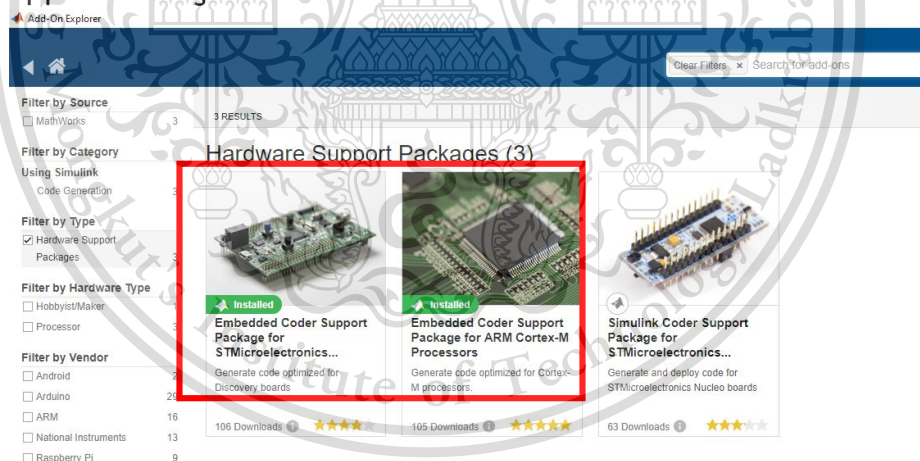
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) เข้าไปที่ See More ในส่วน Filter by Vendor (แถบด้านซ้าย) แล้วเลือก STMicroelectronics ตามกรอบสีแดงในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ตำแหน่งเมนู STMicroelectronics

3) ทำการติดตั้ง Hardware Support Packages 2 ตัว คือ “Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics Discovery Boards” และ “Embedded Coder Support Package for ARM Cortex-M Processors” แสดงในกรอบสีแดงดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 Hardware Support Packages ที่ต้องการติดตั้ง

4) เมื่อทำการติดตั้งสำเร็จหน้าต่าง Add-Ons Manager จะแสดงเครื่องมือที่เคยติดตั้งสำเร็จทั้งหมด ซึ่งจะปรากฏ Hardware Support Packages ที่ทำการติดตั้งล่าสุดดังรูปที่ 1.10

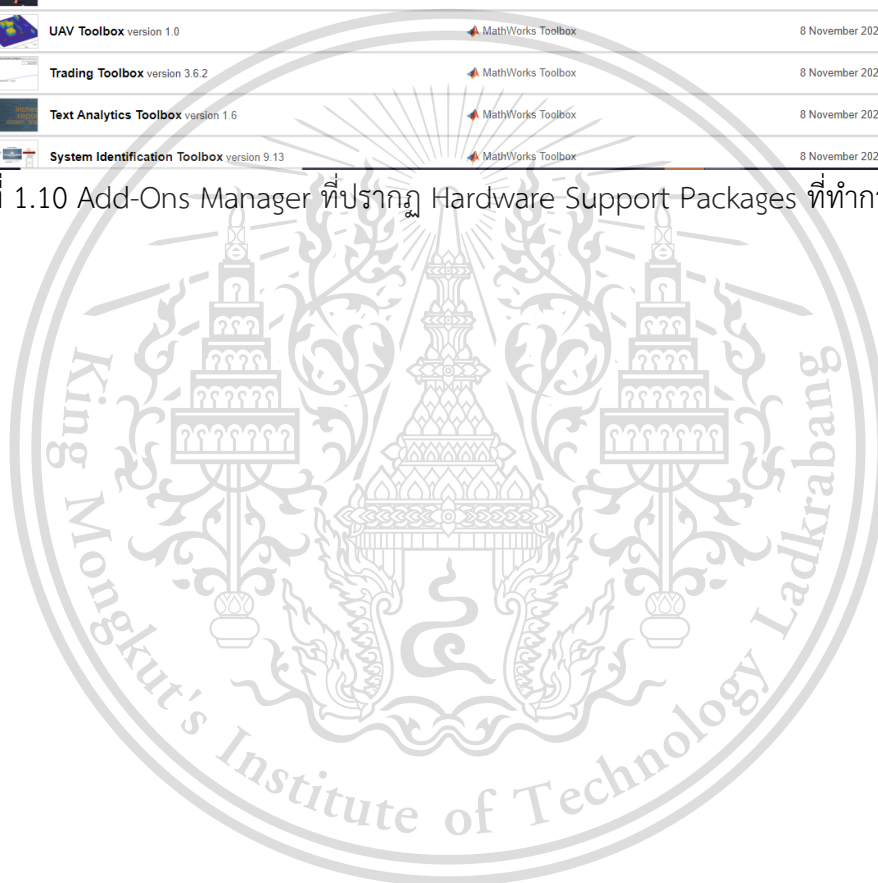
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Name	Type	Author	Install Date
<b>Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics Discovery Boards</b> version 20.2.0	Hardware Support Package		9 November 2020
<b>Embedded Coder Support Package for ARM Cortex-M Processors</b> version 20.2.0	Hardware Support Package		9 November 2020
<b>WLAN Toolbox</b> version 3.1	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Wireless HDL Toolbox</b> version 2.1	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Wavelet Toolbox</b> version 5.5	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Vision HDL Toolbox</b> version 2.2	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Vehicle Network Toolbox</b> version 4.5	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Vehicle Dynamics Blockset</b> version 1.5	MathWorks Product		8 November 2020
<b>UAV Toolbox</b> version 1.0	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Trading Toolbox</b> version 3.6.2	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>Text Analytics Toolbox</b> version 1.6	MathWorks Toolbox		8 November 2020
<b>System Identification Toolbox</b> version 9.13	MathWorks Toolbox		8 November 2020

รูปที่ 1.10 Add-Ons Manager ที่ปรากฏ Hardware Support Packages ที่ทำการติดตั้งล่าสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

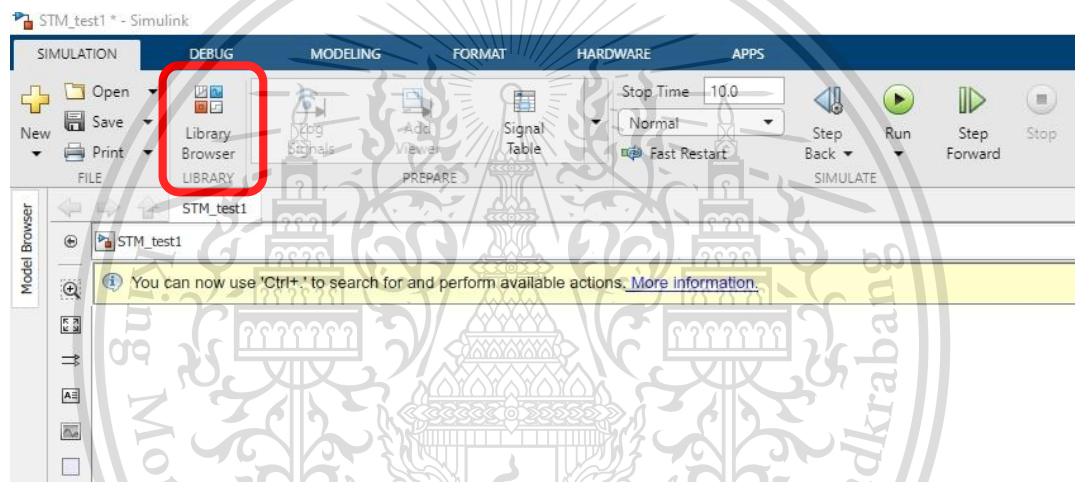
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2 ทดสอบการใช้งานบอร์ดโดยเบี่ยงต้น (Bypass Signal)

1. เปิดโปรแกรม Simulink บน MATLAB (ที่ได้ติดตั้ง Library และ packages ต่างๆ สำหรับการใช้งานบอร์ดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว)

จากนั้นจะทำการทดลองการทำงานของ CODEC (ในมุมมองทั้ง A/D และ D/A) โดยการผ่านสัญญาณ analog-in เข้าไป แปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลลงบนบอร์ด จากนั้นเชื่อมต่อเพื่อแปลงกลับเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งกลางให้กลับไปเป็นสัญญาณ analog-out กลับออกมา

จากหน้าต่าง Blank model กดเลือก Library Browser ดังรูปที่ 2.1



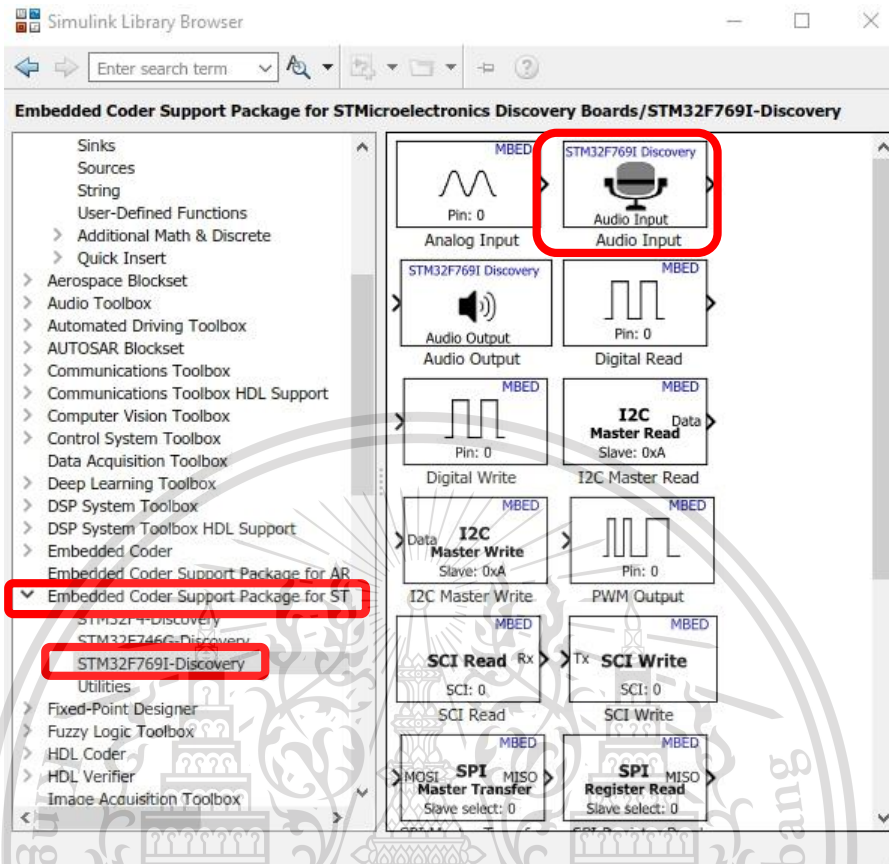
รูปที่ 2.1 Library Browser บนหน้าต่าง Blank model

2. เมื่อทำการกด Library Browser บนหน้าต่าง Blank model จะได้หน้าต่าง Simulink Library Browser แล้วไปที่ Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics Discovery Boards -> STM32F769I-Discovery -> Audio Input (ทำหน้าที่เป็น A/D) ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

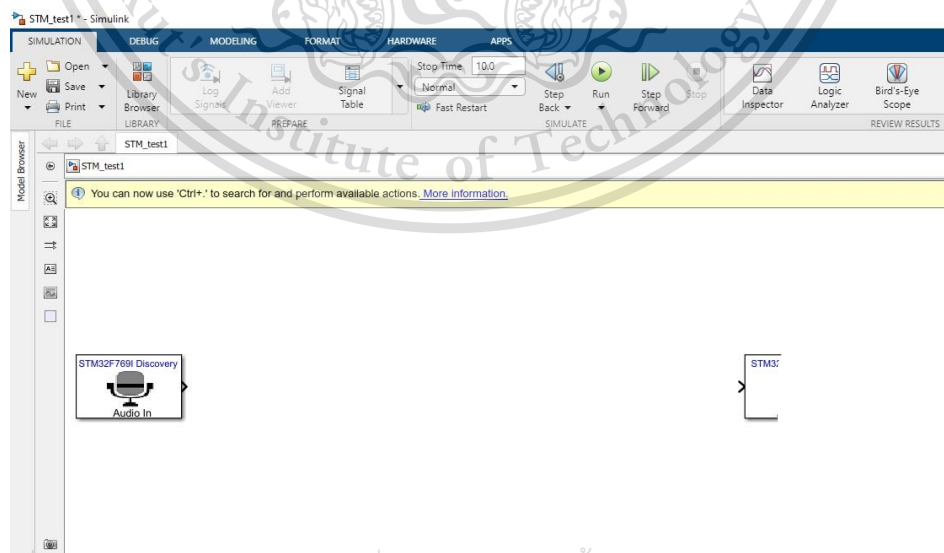
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 การเลือก Audio Input

เมื่อทำการเลือก audio input จะได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 audio input

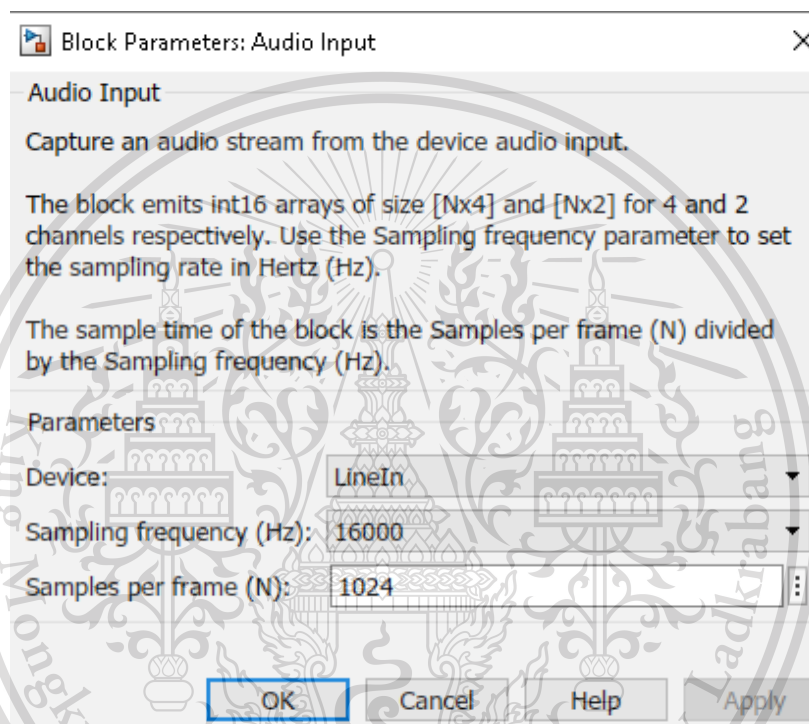
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระหว่างชั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บล็อก audio input จะทำการอ่านเสียงจากอุปกรณ์เสียง (ไมโครโฟน, Line In) ที่เชื่อมต่อกับตัวประมวลผลบนบอร์ด STM32F769I โดยที่เสียงจะอยู่ในรูปแบบ Pulse Density Modulation (PDM) หรือ Pulse Code Modulated (PCM) ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่บล็อกได้รับเสียงมา

จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ใน Blocks Audio Input ดังในรูปที่ 2.4 คือเลือก Device เป็น Line-in, Fs = 16 kHz และ Sample per frame กำหนดให้เป็น 512



รูปที่ 2.4 ตั้งค่าพารามิเตอร์ Audio Input

จากรูปที่ 2.4 สำหรับบอร์ด STM32F769I ที่มีกำหนดอินพุตเป็น Line In จะมีเฟรม คือ  $[N \times 2]$  ขึ้นอยู่กับจำนวนช่องสัญญาณที่เลือก

Sampling frequency (Hz) คือ ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างเสียงเพื่ออ่านสัญญาณเสียงจากอุปกรณ์

สำหรับบอร์ด STM32F769I จะเริ่มต้นจากค่า 8,00 11,025 16,000 22,050,32,00 และ 44,100 Hz

และ Samples per frame (N) คือ จำนวนตัวอย่างต่อเฟรมที่เอาต์พุต สำหรับบอร์ด STM32F769I จะเริ่มต้นจากค่า 1024 และต้องเป็นจำนวนเต็มระหว่าง 1 และ 65,535

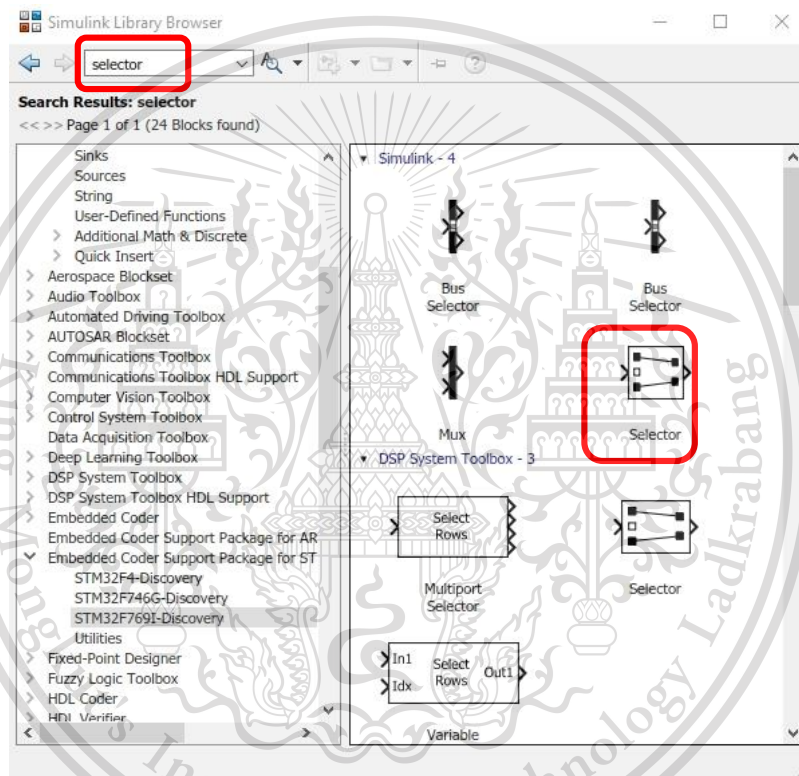
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญญาณเอาต์พุตแบบ Line In เป็นสัญญาณ PCM และมีเฟรม คือ เมตริกซ์  $[N \times 2]$  Data type คือ int 16 เมื่อ N คือ จำนวนของ samples per frame และ 2 คือ จำนวน channel per frame สัญญาณเอาต์พุตจะถูกส่งไปยัง CODEC ของบอร์ดเพื่อทำการแปลงสัญญาณ ซึ่งจะถูกลำส่งไปยัง ARM Cortex จากนั้นเฟรมเหล่านี้จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์เสียงที่เชื่อมต่อ

3. ทำการเลือกอุปกรณ์ Selector ขึ้นมาด้วยการค้นหาหน้าต่าง Simulink Library Browser ดังรูปที่ 2.5



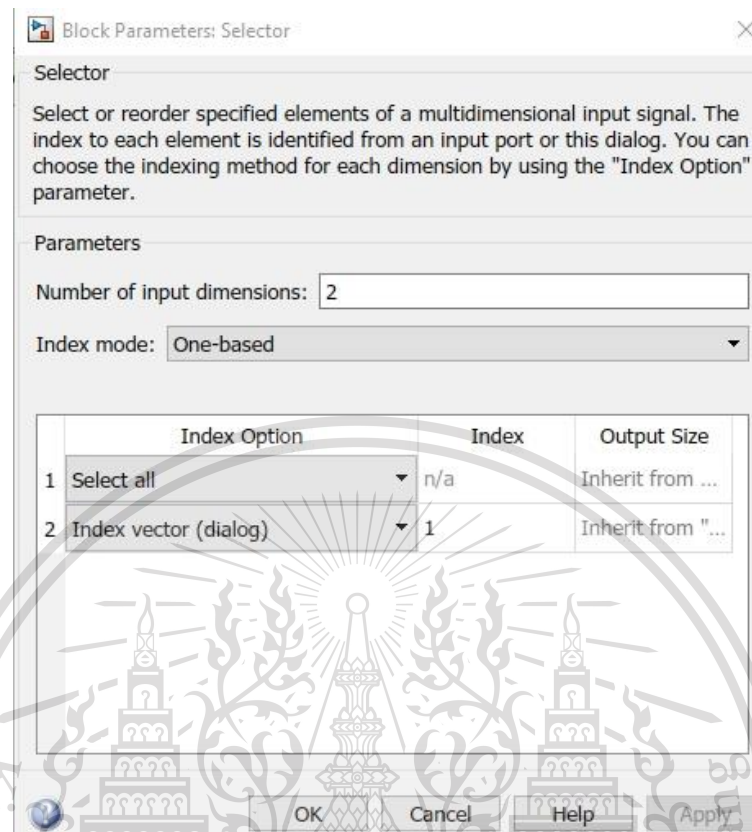
รูปที่ 2.5 Selector

จากนั้นกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆใน Blocks Selector ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 กำหนดพารามิเตอร์ Selector

จากรูปที่ 2.6 การกำหนดพารามิเตอร์ของ selector นั้น ขึ้นอยู่กับค่าที่ป้อน สำหรับพารามิเตอร์ Number of input dimension จะแสดงจำนวนตารางการตั้งค่าเท่ากับค่าที่ป้อนและตั้งค่า index ของตาราง สำหรับแต่ละ dimension สามารถกำหนดองค์ประกอบของสัญญาณที่จะทำงานได้ด้วยการระบุสัญญาณเวกเตอร์เป็นสัญญาณ 1 Dimension และสัญญาณเมทริกซ์เป็นสัญญาณ 2 Dimension เมื่อกำหนดค่าบล็อก Selector สำหรับการทำงานของสัญญาณหลาย Dimension ไอคอนบล็อกจะเปลี่ยนไป

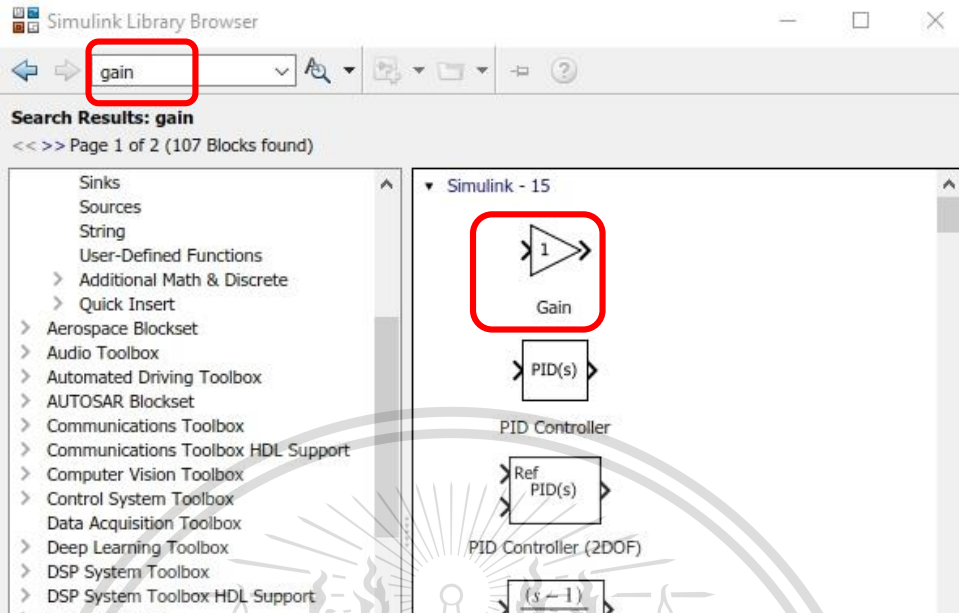
เนื่องจากสัญญาณที่มาจาก CODEC (A/D) นั้นมีลักษณะเป็นสัญญาณ Stereo ในเบื้องต้น จะทำการทดลองลักษณะของ Mono Channel จึงต้องมีการใช้อุปกรณ์ Selector ดังกล่าวเข้ามาช่วย

4. ทำการเลือกอุปกรณ์ Gain ขึ้นมาด้วยการค้นหาหน้าต่าง Simulink Library Browser ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

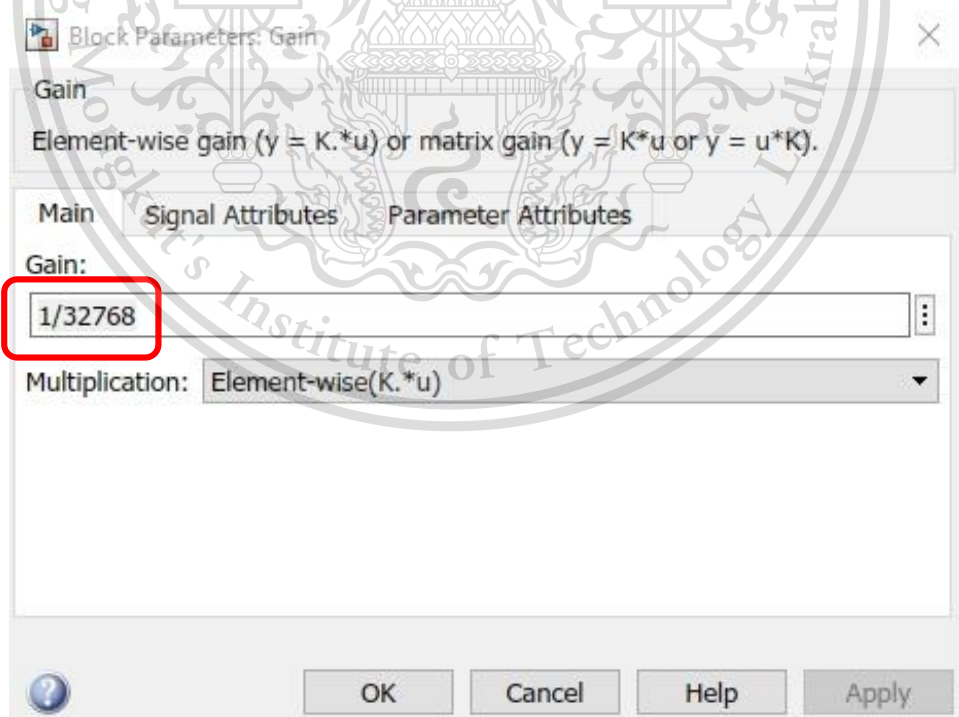
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 Gain

จากนั้นทำการกำหนดค่า gain เป็น  $1/32768$  และกำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นๆให้เป็นดังรูป

ที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กำหนดค่า Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

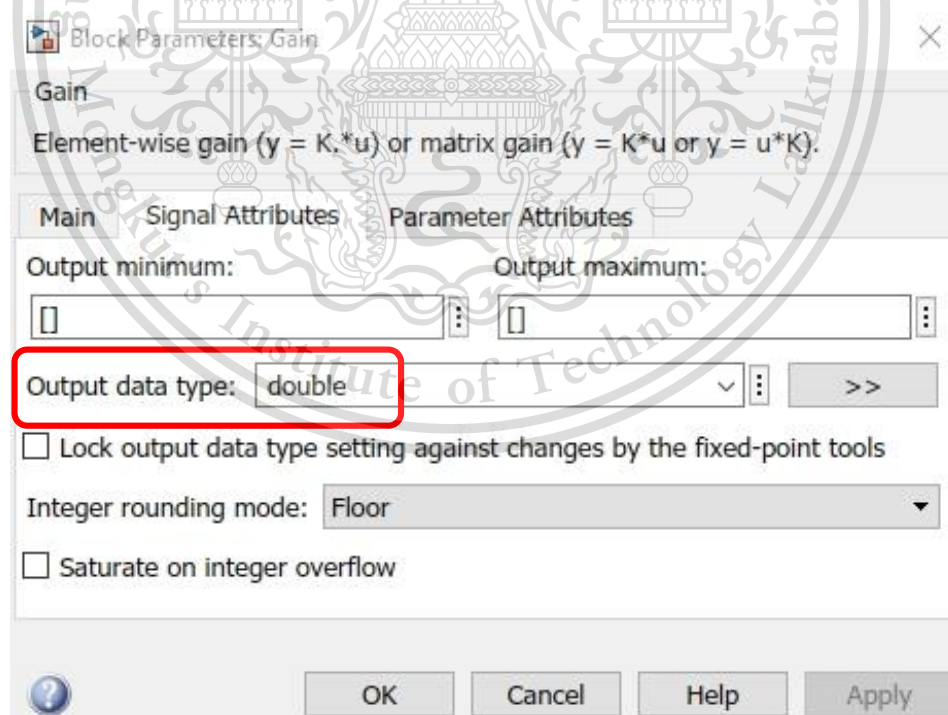
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่า เลือกใช้ Multiplication เป็น element-wise บล็อก gain รับค่า อินพุตเป็นสเกลาร์, เวกเตอร์ หรือเมทริกซ์ที่มีค่าเป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนของข้อมูล ประเภทใดก็ได้ ยกเว้น บูลีน (boolean) และสัญญาณเอาต์พุตต้องเป็นประเภทเดียวกันกับอินพุต องค์ประกอบของเวกเตอร์อินพุตต้องเป็นประเภทเดียวกัน เป็นไปตามกฎดังนี้

ถ้าอินพุตเป็นจำนวนจริงและ gain เป็นจำนวนเชิงซ้อน เอาต์พุตจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน

ถ้าประเภทข้อมูลของพารามิเตอร์ gain แตกต่างจากประเภทข้อมูลของสัญญาณอินพุตและประเภทข้อมูลอินพุตสามารถแสดง gain ได้ Simulink จะแปลง gain เป็นประเภทอินพุตก่อนที่จะคำนวณเอาต์พุต มิฉะนั้น Simulink จะหยุดการทำงานและ error ตัวอย่างเช่น ถ้าประเภทข้อมูลอินพุตเป็น unit8 และ Gain คือ -1 ผลลัพธ์จะแสดง error และถ้าผลลัพธ์ออกมาเป็นสูญเสียความแม่นยำ Simulink จะเตือนและทำการจำลองต่อไป

การ scale ค่า gain ดังกล่าวก็เพื่อให้การดำเนินการเชิงตัวเลขพิจารณาได้ว่าค่าของ digital signal ที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง [-1, 1) ด้วยค่าดั้งเดิมของ original signal ซึ่งเป็นสัญญาณ stereo ขนาด 16 bits/channel และการคำนวณเป็นแบบระบบตัวเลขแบบคิดเครื่องหมายการ scale จึงดำเนินการด้วยค่าตัวเลข 1/32768 ดังกล่าว นอกจากนั้นตรง Signal Attributes Tab ให้ทำการเลือก output data type เป็น double คือ precision floating point จากรูปที่ 2.7 (เพื่อจะได้สามารถนำไปประมวลผลทางคณิตศาสตร์ต่อไปในกรณีที่จะดำเนินการทางด้าน DSP ต่อ)



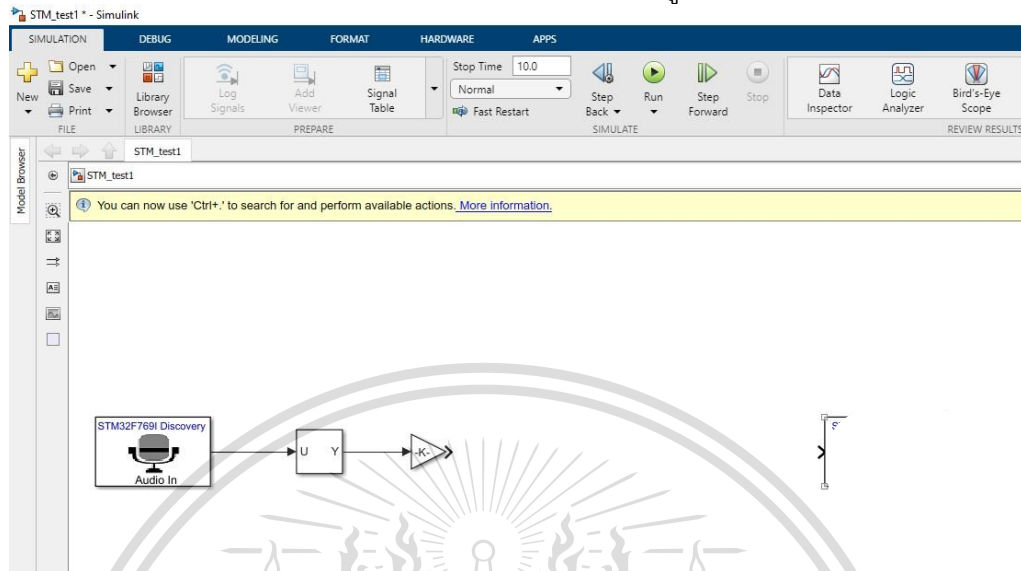
รูปที่ 2.7 กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของ Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการเชื่อมต่อโครงสร้าง ขณะนี้จะได้ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเชื่อมต่อโครงสร้าง

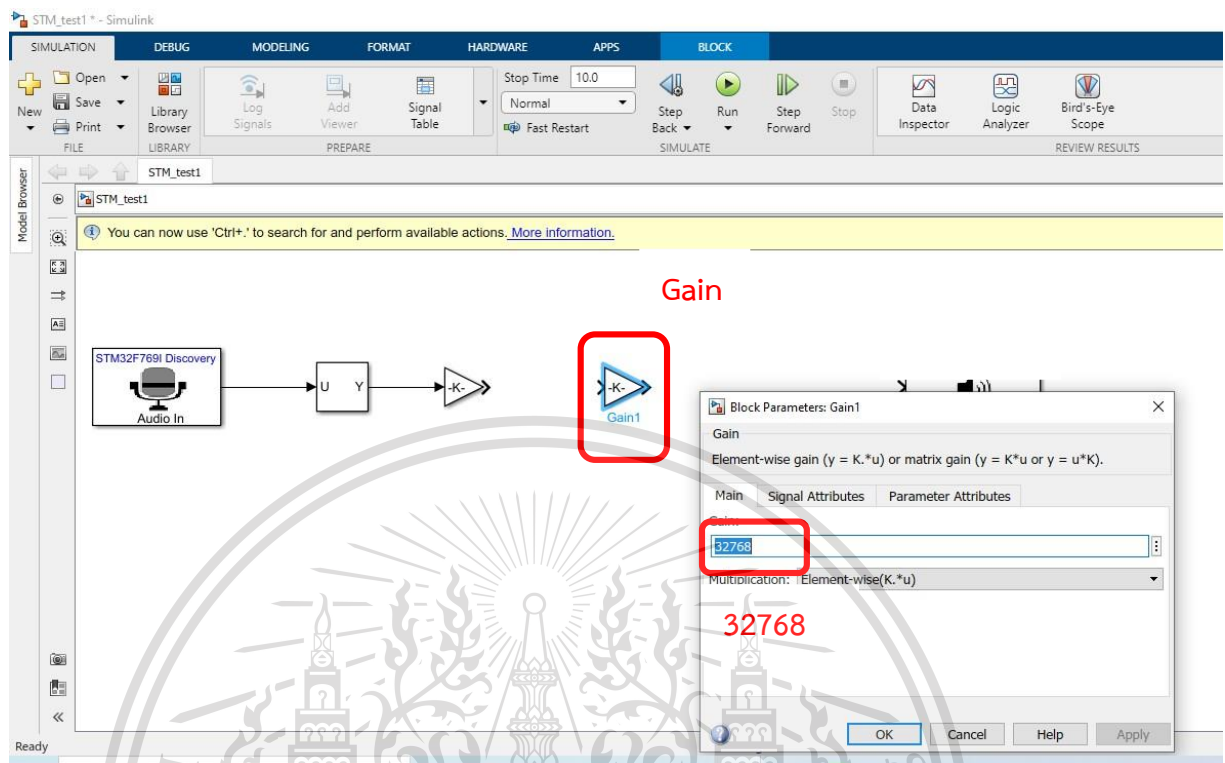
หลังจาก Block gain สามารถเพิ่มส่วนของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP System) ใดๆลงไปต่อได้เลย เช่น Digital filter เป็นต้น แต่ในกรณีนี้เป็นการทดลองใช้บอร์ด เบื้องต้นจึงยังไม่ใส่การประมวลผลใดๆ แต่จะเชื่อมต่อตรงเพื่อแปลงกลับเป็น Audio-output

6. หลังจาก block gain แล้วจะเชื่อมต่อตรงเพื่อแปลงกลับเป็น Analog-Output เลย ก็จะทำดำเนินการต่อดังนี้ นำ gain อีกตัวมาวางเชื่อมต่อกันไปด้วยการกำหนดค่า gain เป็น 32768 ดังรูปที่ 2.9

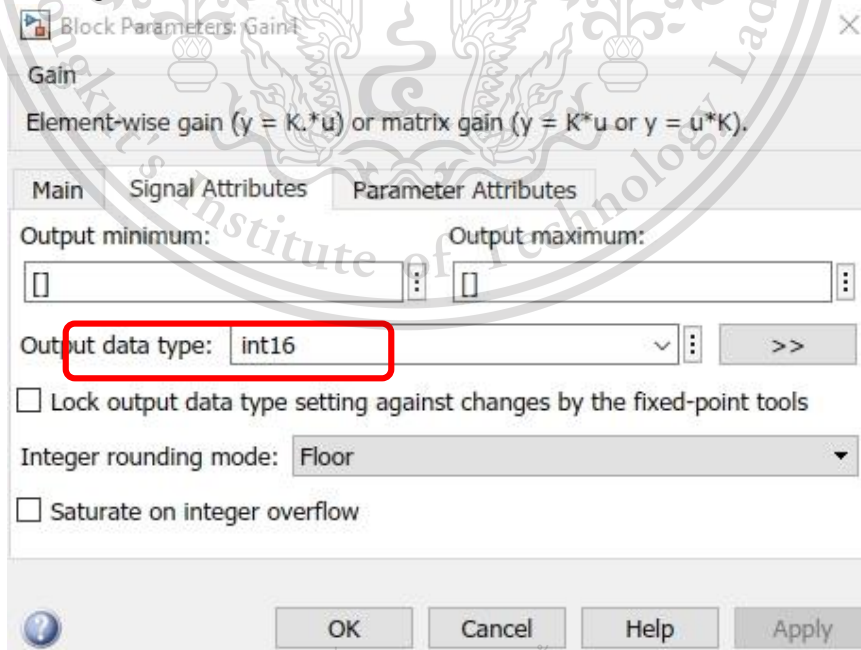
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 เลือกอุปกรณ์ Gain1 และกำหนดค่า  
ซึ่งสำหรับ gain ในฝั่งขาออกนั้นจำเป็นต้องเลือก Signal Attributes สำหรับ output data type เป็น int16 ดังรูปที่ 2.10 เนื่องด้วย CODEC ( ฝั่ง D/A ) นั้น มีขนาดเป็น 16 bits/channel (สำหรับ stereo signal)



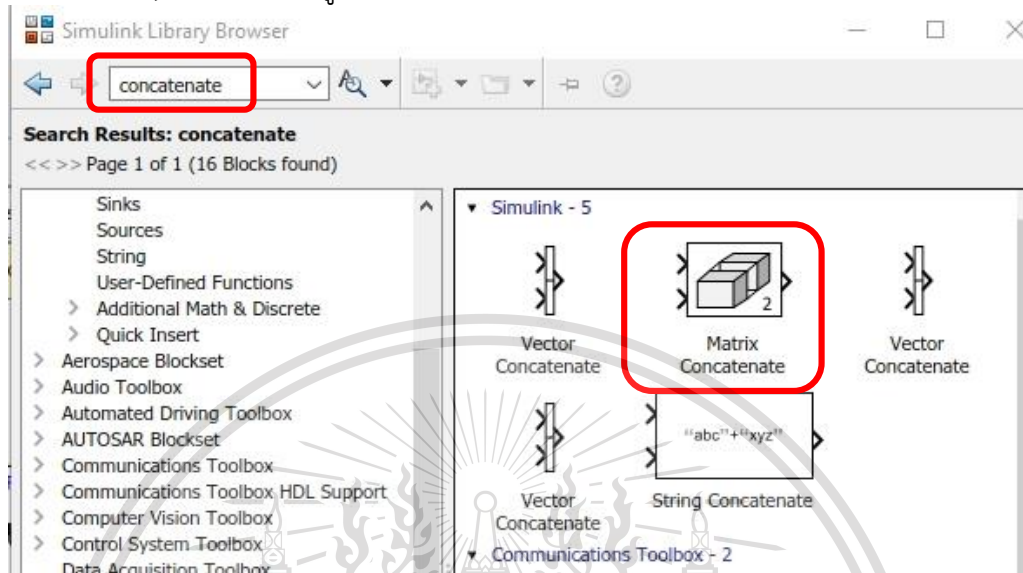
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.10 กำหนดค่าพารามิเตอร์ Gain1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7. นำอุปกรณ์ที่ชื่อว่า Matrix concatenate มาเชื่อมต่อด้วยการค้นหาบนหน้าต่าง Simulink Library Browser ดังรูปที่ 2.11



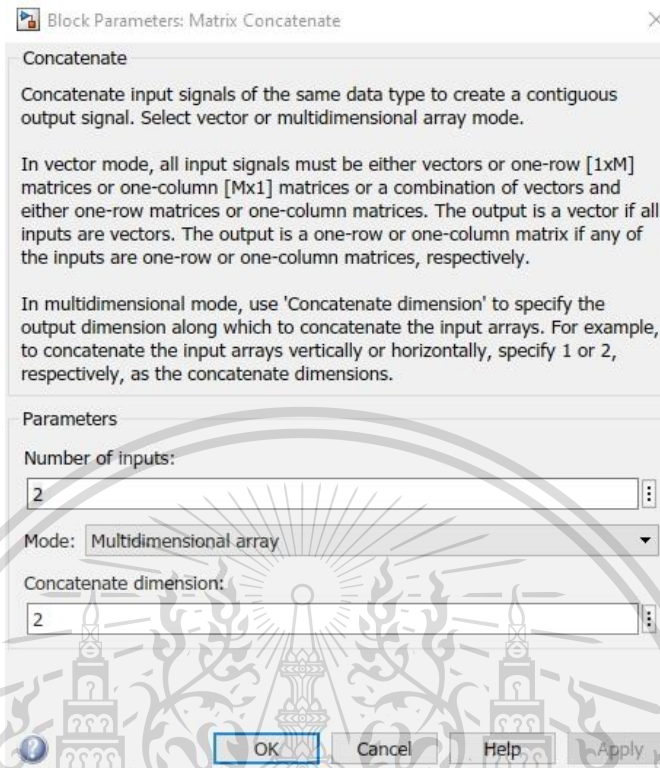
รูปที่ 2.11 Matrix concatenate

จากรูปที่ 2.11 บล็อก Matrix concatenate จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณอินพุตเข้าด้วยกัน เพื่อสร้างสัญญาณเอาต์พุตแบบไม่เหมือน ซึ่งมีตำแหน่งขององค์ประกอบที่อยู่ติดกันในหน่วยความจำ ข้อกำหนดของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตขึ้นอยู่กับโหมดของการเชื่อมต่อ จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



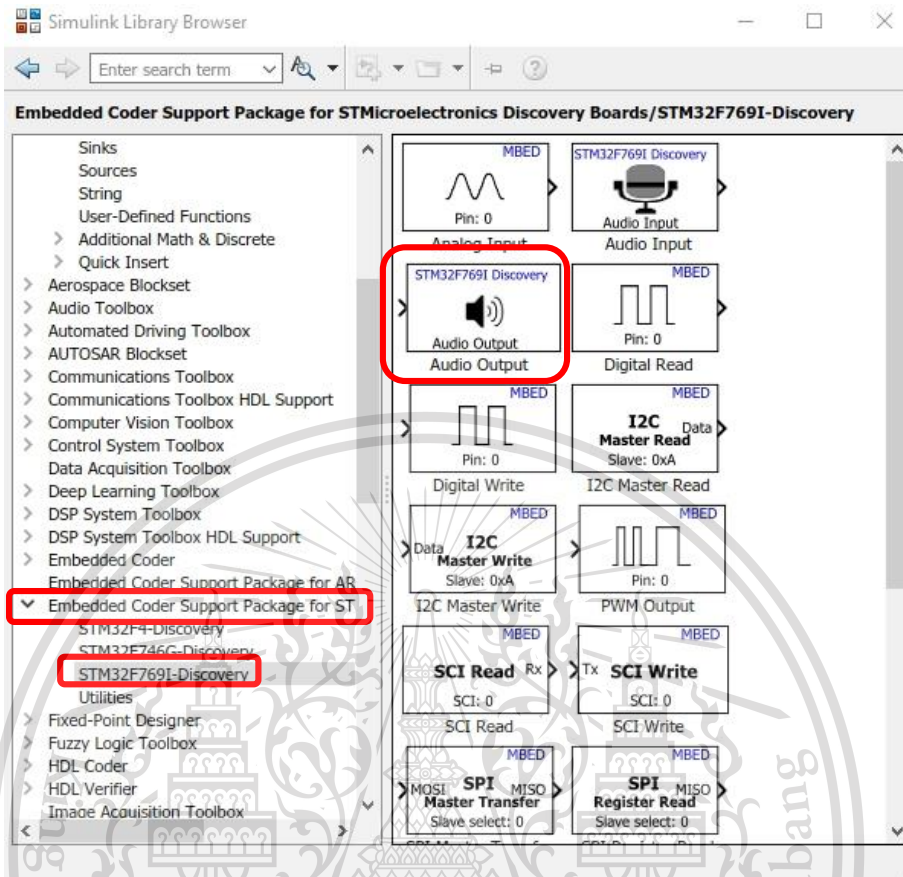
รูปที่ 2.12 กำหนดค่าพารามิเตอร์ Concatenate

8. บนหน้าต่าง Simulink Library Browser ไปที่ Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics Discovery Boards -> STM32F769I-Discovery -> Audio Output ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

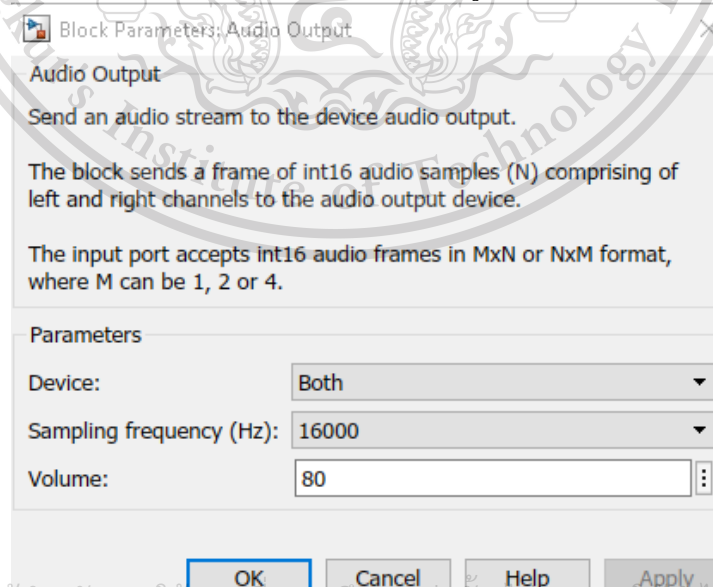
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.13 การเลือก audio output

จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตั้งค่าพารามิเตอร์ audio output

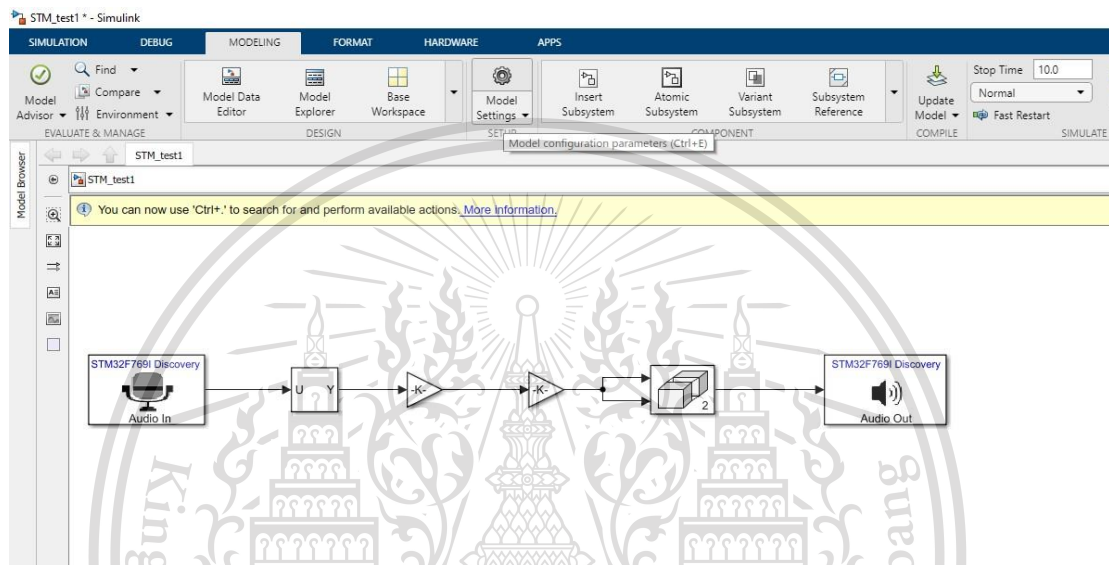
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 2.14 กำหนดค่า Sampling frequency (Hz) ให้เท่ากับอินพุต และในส่วนของ Volume คือ ความดังของสัญญาณเอาต์พุต สำหรับบอร์ด STM32F769I จะเริ่มต้นที่ 80 และต้องเป็นค่าจำนวนเต็มระหว่าง 0 ถึง 100

9. ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทุกอย่างสมบูรณ์ จะได้หน้าต่าง ดังรูปที่ 2.15 แล้วทำการ save และตั้งชื่อ file



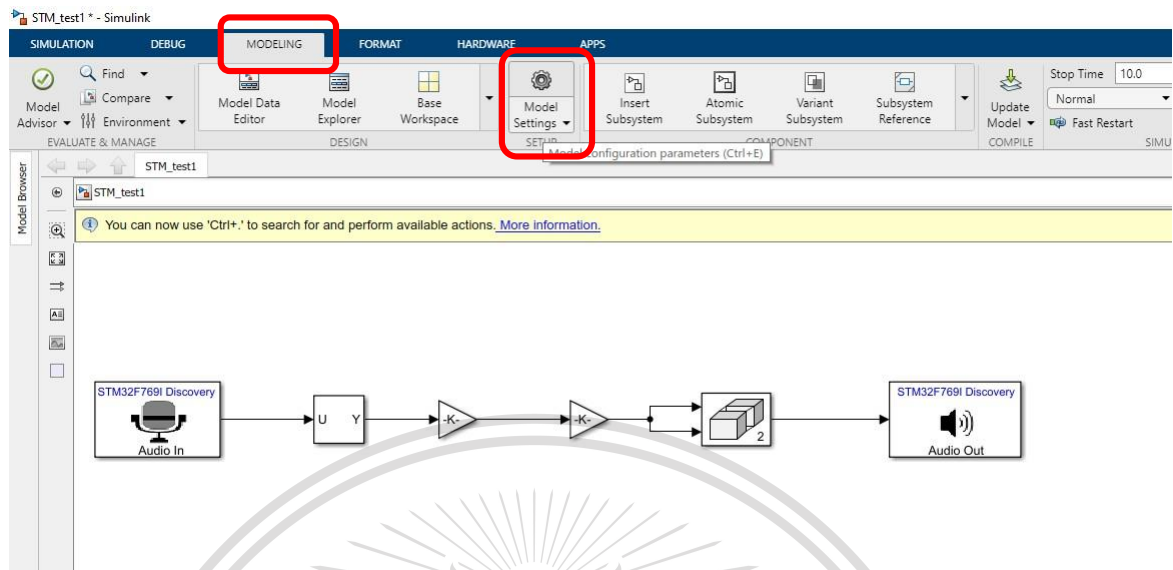
รูปที่ 2.15 วงจรสร้างระบบเสียง Stereo

10. การกำหนด configuration เพื่อเตรียมการ download ลงบอร์ด STM32F769I เชื่อมต่อสาย USB สำหรับ board ให้เรียบร้อย โดยที่จะเชื่อม USB ในช่อง ST-Link16 ของบอร์ด และจะทดสอบโดยการใส่ function generator บ้อนสัญญาณ sine เข้าไปแล้ววัดเอาต์พุตโดยใช้ oscilloscope ต่อหูฟัง/ลำโพงจากช่อง Line-Out และต่อเครื่องเล่นเสียงนำเสียงผ่านเข้าช่อง Line-In แล้วให้ไปที่ Model Configuration Parameters ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

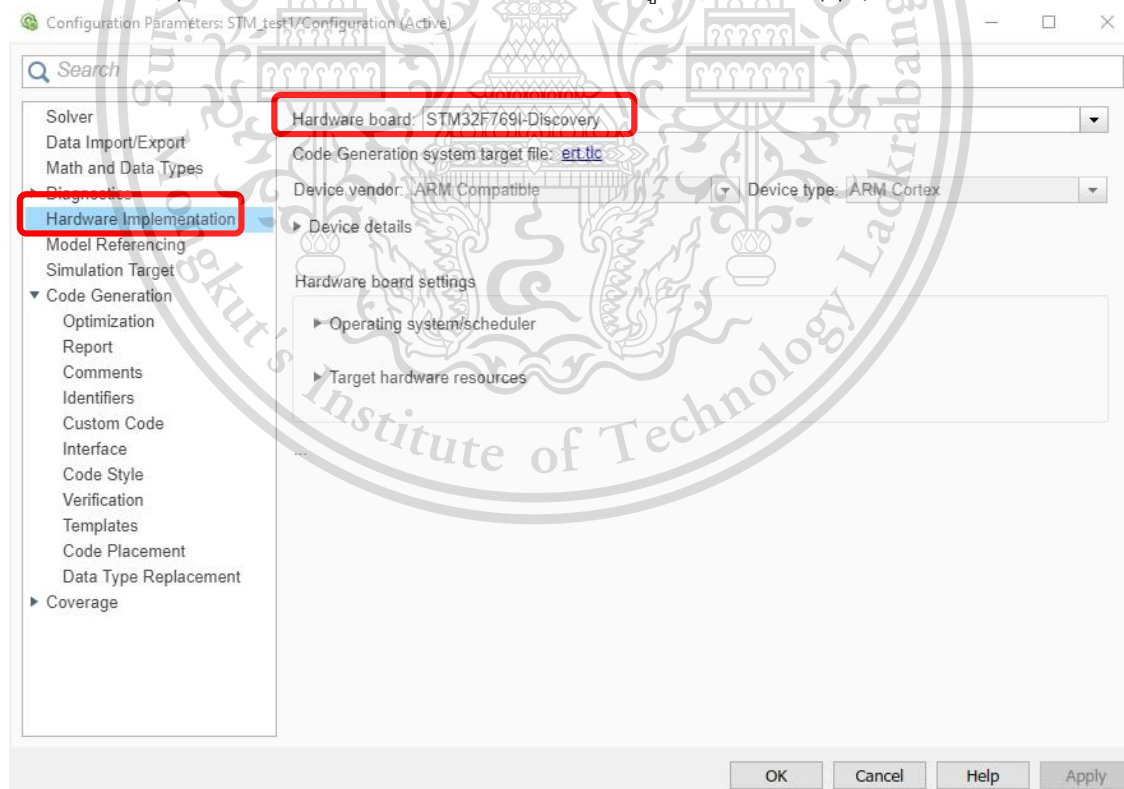
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.16 Model Configuration Parameters

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Configure Parameters ให้เลือกหัวข้อ Diagnostics -> Hardware Implementation แล้วเลือกบอร์ดเป็นดังในรูป 2.17 กด apply และ ok



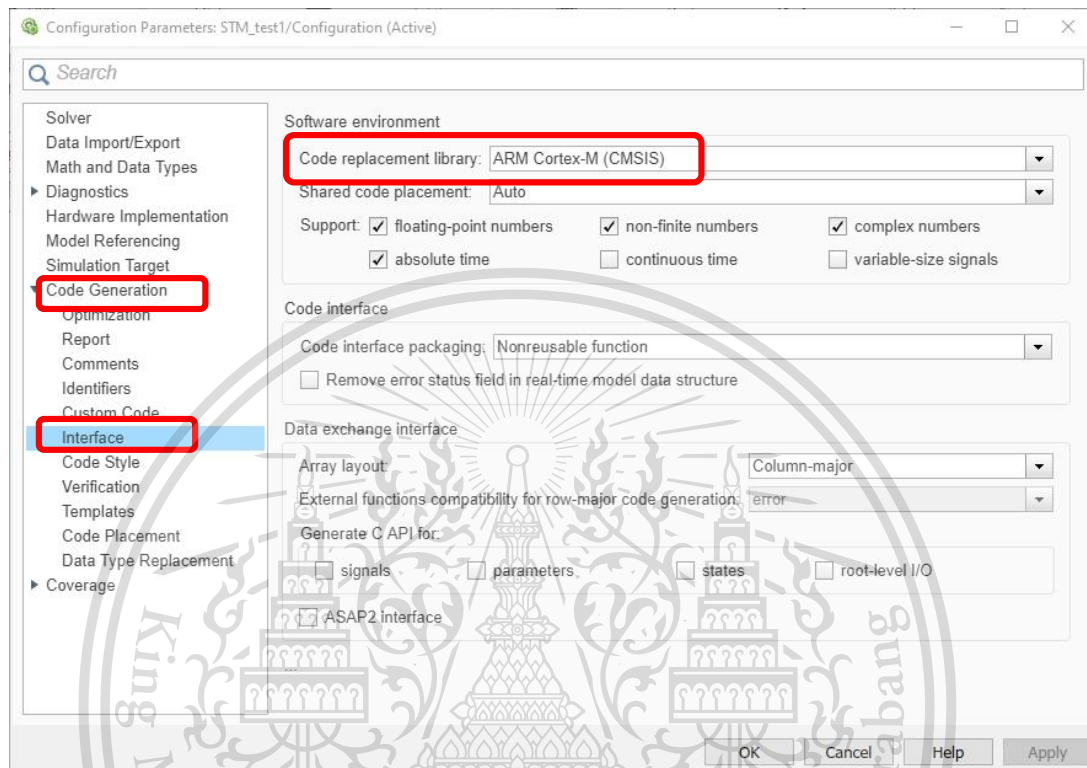
รูปที่ 2.17 ทำการ configuration (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นไปที่ Code Generation -> Interface และเลือก Code replacement library เป็น ARM Cortex-M (CMSIS) ดังรูปที่ 2.18 จากนั้นกด apply และ ok



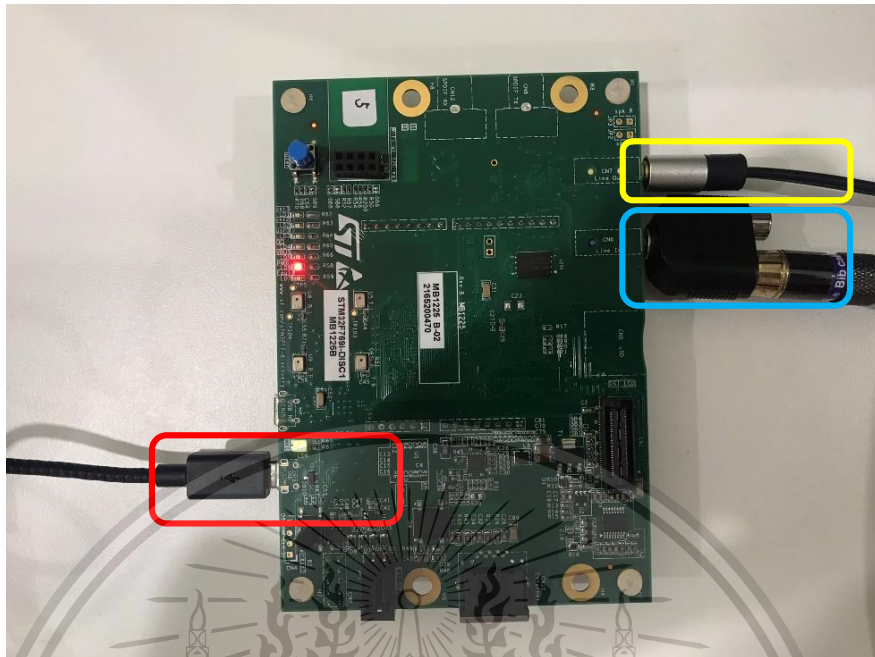
รูปที่ 2.18 ทำการ configuration (2)

11. ทำการเชื่อมต่อสายกับเครื่อง Oscilloscope เพื่อทำการวัดผลให้เรียบร้อย โดยที่จะเชื่อม USB ของคอมพิวเตอร์กับช่อง ST-Link16 ของบอร์ด (กรอบสีแดงหรือกรอบทางซ้าย), เชื่อม source ในช่อง Line Out กับเครื่อง Oscilloscope (กรอบสีเขียวหรือกรอบทางขวาที่อยู่ด้านบน) และเชื่อมช่องการวัดผลในช่อง Line In กับเครื่อง Oscilloscope (กรอบสีฟ้าหรือกรอบทางขวาที่อยู่ด้านล่าง) ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 แสดงภาพหน้าและด้านหลังของบอร์ด ตามลำดับ รูปที่ 2.21, 2.22 และ 2.23 แสดงการเชื่อมต่อสายกับเครื่อง Oscilloscope ตามลำดับ

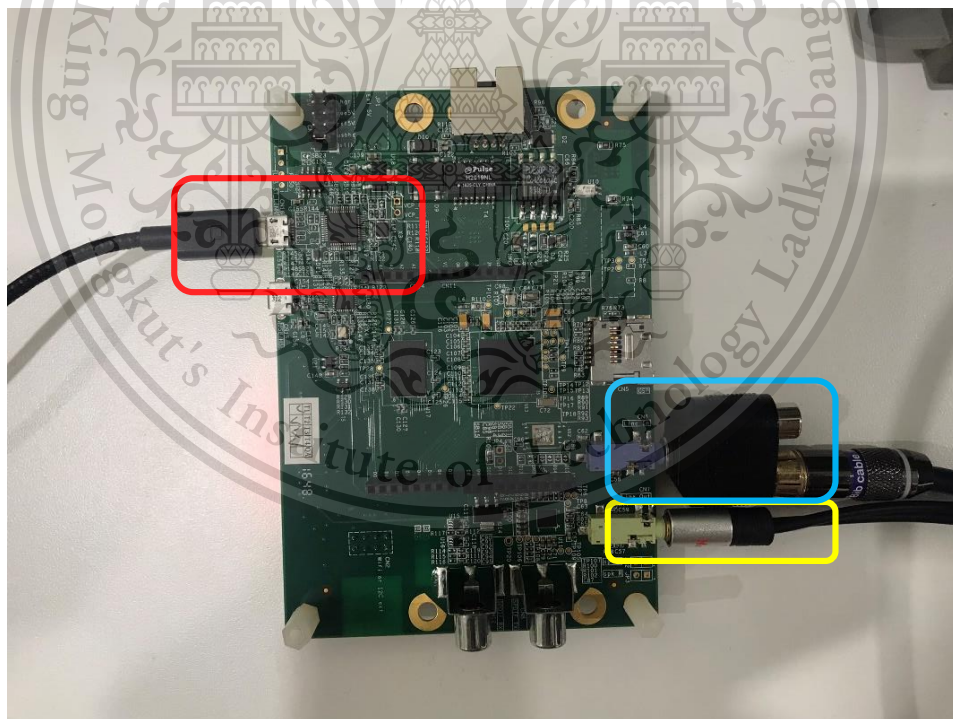
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.19 การเชื่อมต่อสายของบอร์ดด้านหน้า

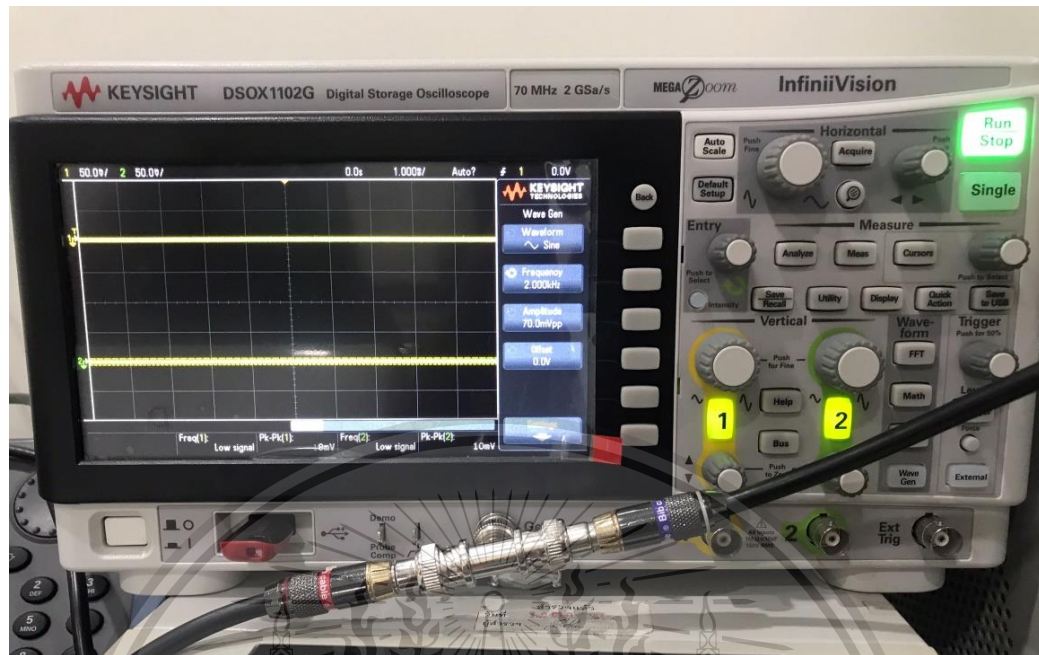


รูปที่ 2.20 การเชื่อมต่อสายของบอร์ดด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

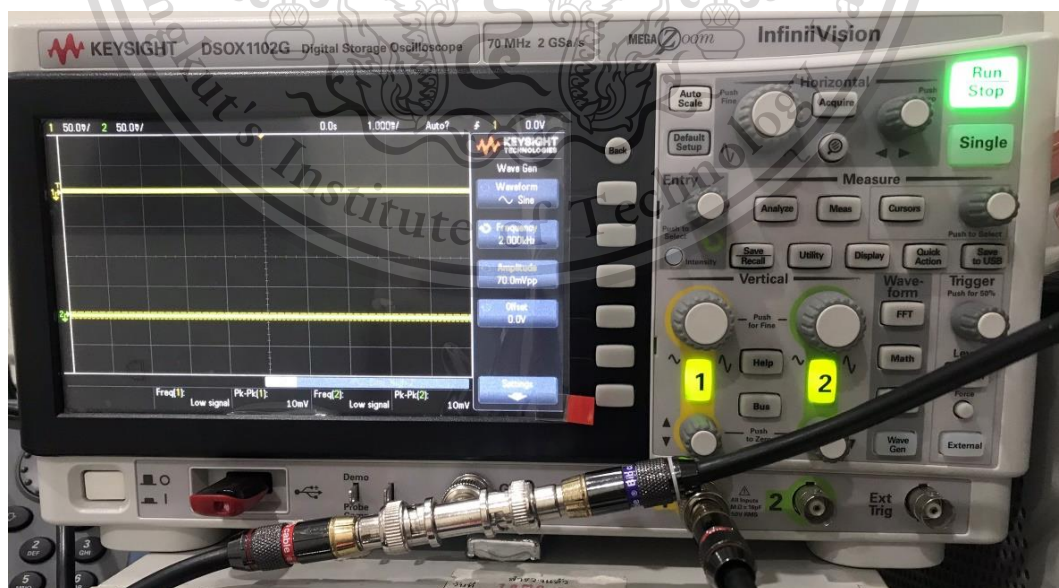
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.21 การเชื่อมต่อสายกับเครื่อง Oscilloscope (1)

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าในช่อง Gen out ของเครื่อง Oscilloscope เชื่อมมาจากช่อง Line In ของบอร์ดเพื่อเป็นการเชื่อมข้อมูลจากบอร์ดกับเครื่อง Oscilloscope จากนั้นต่อกับสายอีกเส้นเข้ากับ Channel 1 เพื่อเป็นการแสดงสัญญาณ Input ที่ป้อนเข้าไป ดังรูปที่ 2.22 และเชื่อมช่อง Line Out ของบอร์ดกับ Channel 2 เพื่อเป็นการแสดงสัญญาณ Output ดังรูปที่ 2.23



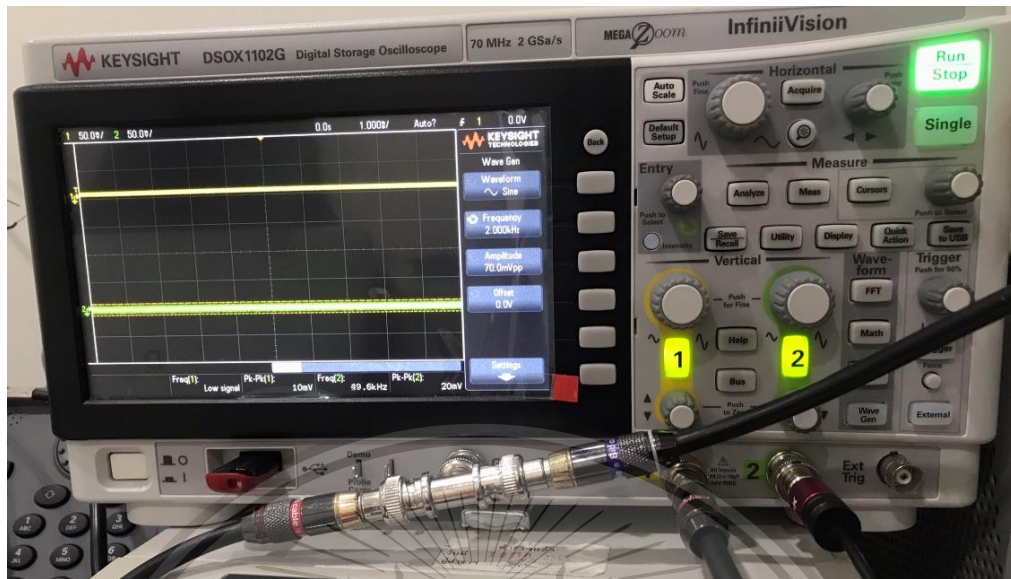
รูปที่ 2.22 เชื่อม Channel 1 เพื่อเป็นการแสดงสัญญาณ Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

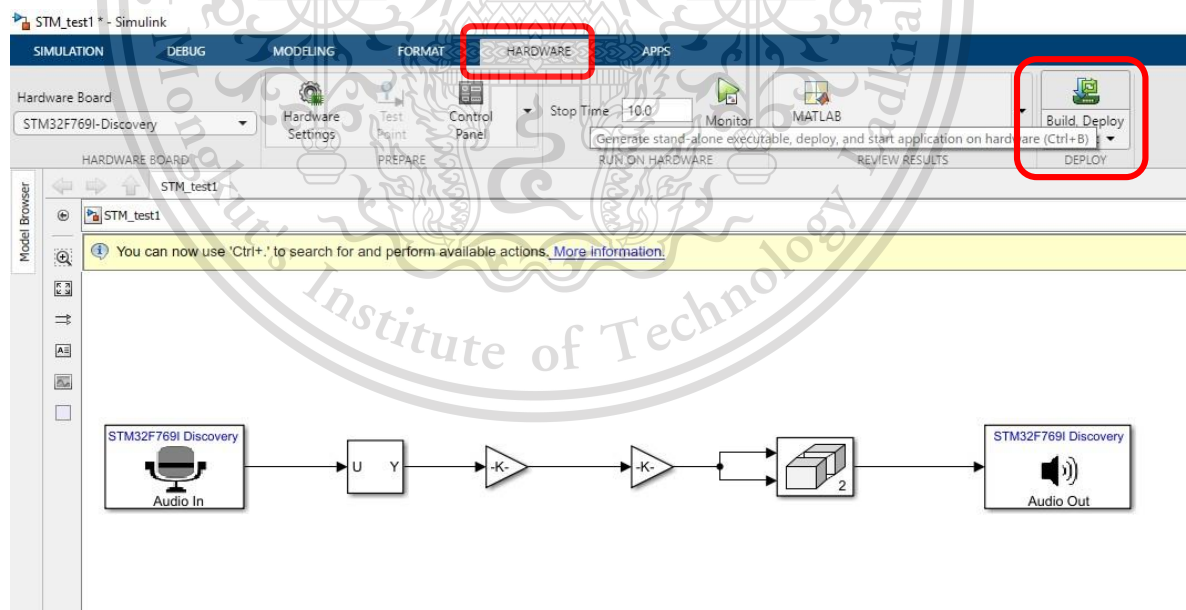
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.23 เชื่อม Channel 2 เพื่อเป็นการแสดงสัญญาณ Output

12. ทำการ deploy ลงบอร์ด โดยดำเนินการตามในรูปที่ 2.24 Mode ในการ Run Simulink เป็น normal จากนั้นปุ่ม Deploy to Hardware จะทำการเลือกหลังจากกดเลือกแล้ว รอสักพัก



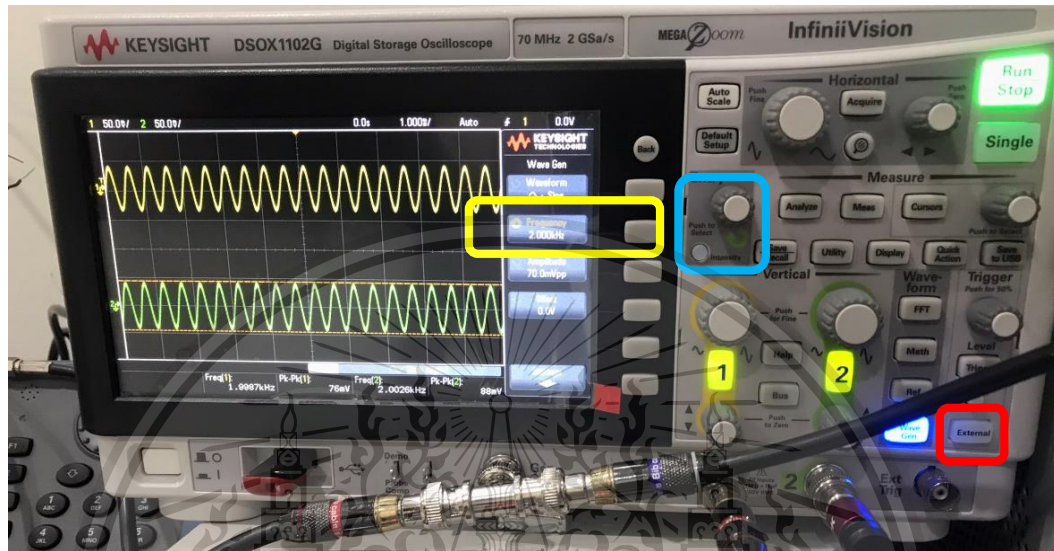
รูปที่ 2.24 ทำการ deploy ลงบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

13. เมื่อทำการ build ลงบอร์ดสำเร็จ ให้ตั้งค่าที่เครื่อง Oscilloscope เพื่อทำการทดสอบบอร์ด ให้กดที่ปุ่ม Wave Gen หลังจากกดปุ่มนั้นจะเป็นสีฟ้า ดังรูปที่ 2.25 (กรอบสีแดงหรือกรอบที่อยู่ด้านขวาล่าง)



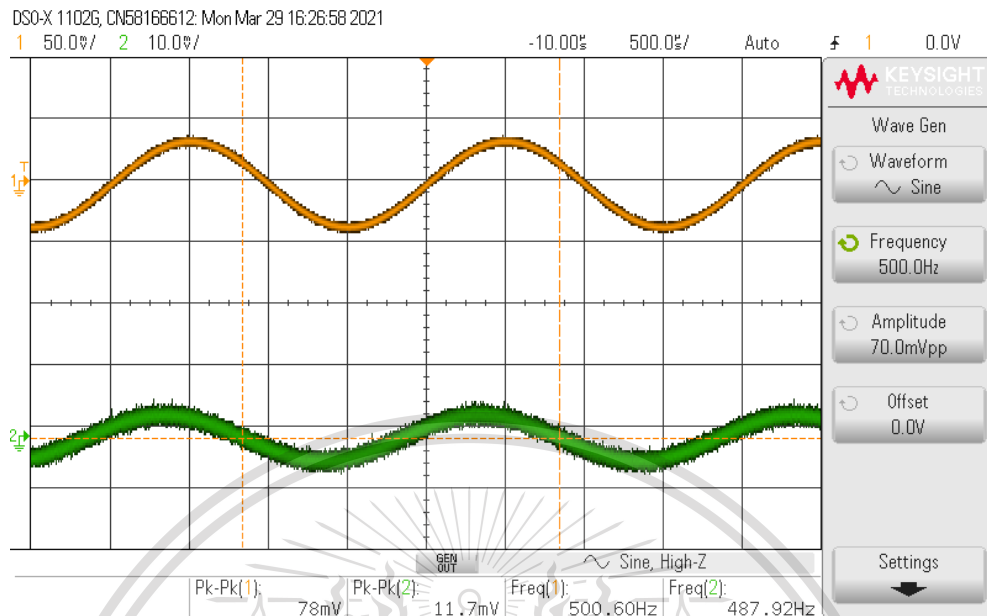
รูปที่ 2.25 กดปุ่ม wave Gen

จากรูปที่ 2.25 จะเห็นว่า หลังจากกดปุ่มทั้ง 2 channel จะแสดงสัญญาณ sine และแถบให้ปรับค่าต่างๆ ให้เลือกที่ frequency (กรอบสีเหลืองหรือกรอบแนวนอน) จากนั้นทำการปรับค่า โดยการหมุนที่ปุ่ม Entry (กรอบสีฟ้าหรือกรอบที่อยู่ติดกับปุ่ม Frequency) ในรูปที่ 2.25 เมื่อหมุนค่าที่ต้องการให้ทำการกดที่ปุ่มนั้นอีกครั้ง ในการทดสอบครั้งนี้จะทำการทดสอบที่ความถี่ 500 Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz, 9kHz และ 10 kHz ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.26 - 2.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

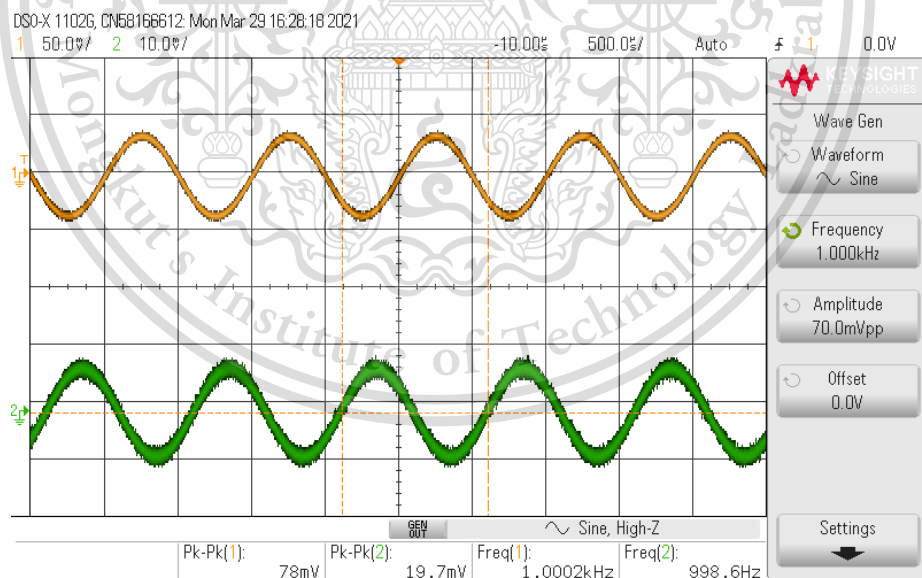
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.26 ทดสอบที่ความถี่ 500 Hz

จากรูปที่ 2.26 จะเห็นว่าที่ความถี่ 500 Hz สัญญาณ Output ผ่านออกมาได้ แต่มีขนาดแอมพลิจูดน้อยกว่าสัญญาณ input มาก

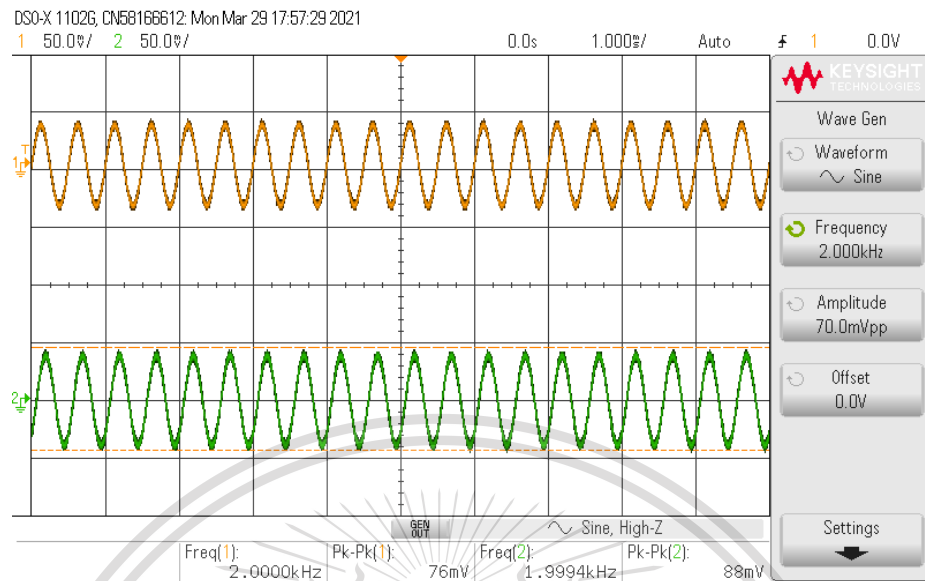


รูปที่ 2.27 ทดสอบที่ความถี่ 1 kHz

จากรูปที่ 2.27 จะเห็นว่าที่ความถี่ 1 kHz สัญญาณ Output ผ่านออกมาได้ แต่มีขนาดแอมพลิจูดน้อยกว่าสัญญาณ input ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

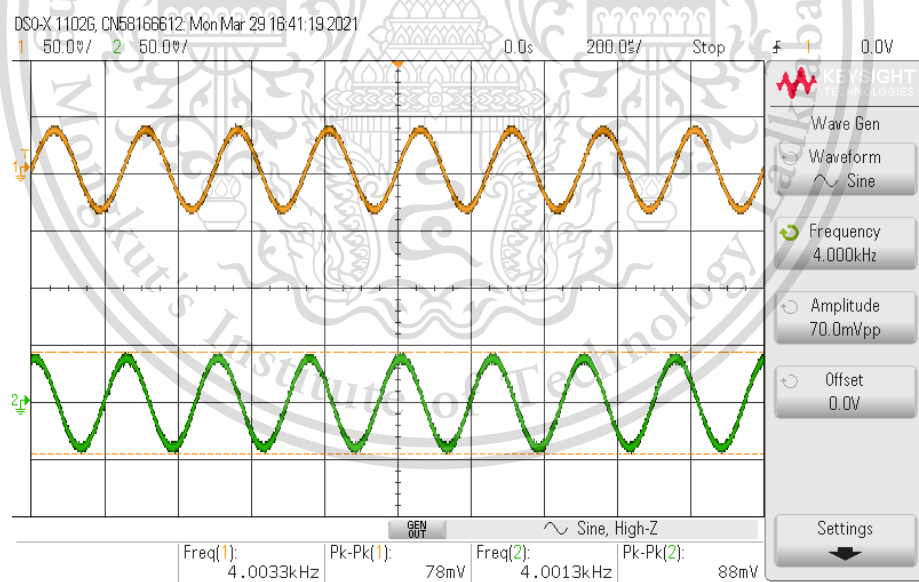
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.28 ทดสอบที่ความถี่ 2 kHz

จากรูปที่ 2.28 จะเห็นว่าที่ความถี่ 2 kHz สัญญาณ Output ผ่านออกมาได้ แต่มีขนาดแอมพลิจูดใกล้เคียงกับสัญญาณ input



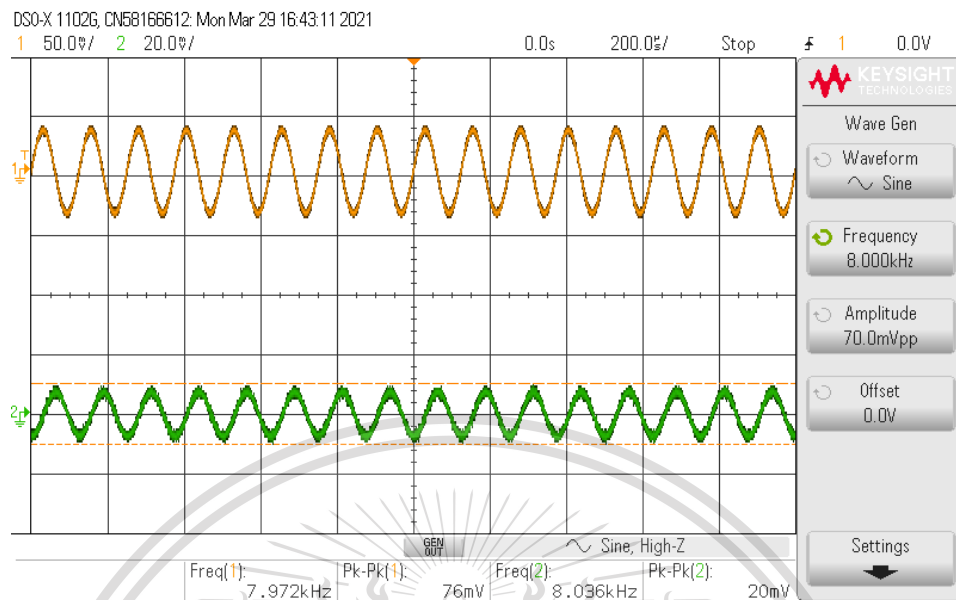
รูปที่ 2.29 ทดสอบที่ความถี่ 4 kHz

จากรูปที่ 2.29 จะเห็นว่าที่ความถี่ 4 kHz สัญญาณ Output ผ่านออกมาได้ แต่มีขนาดแอมพลิจูดใกล้เคียงกับสัญญาณ input เหมือนกับที่ความถี่ 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

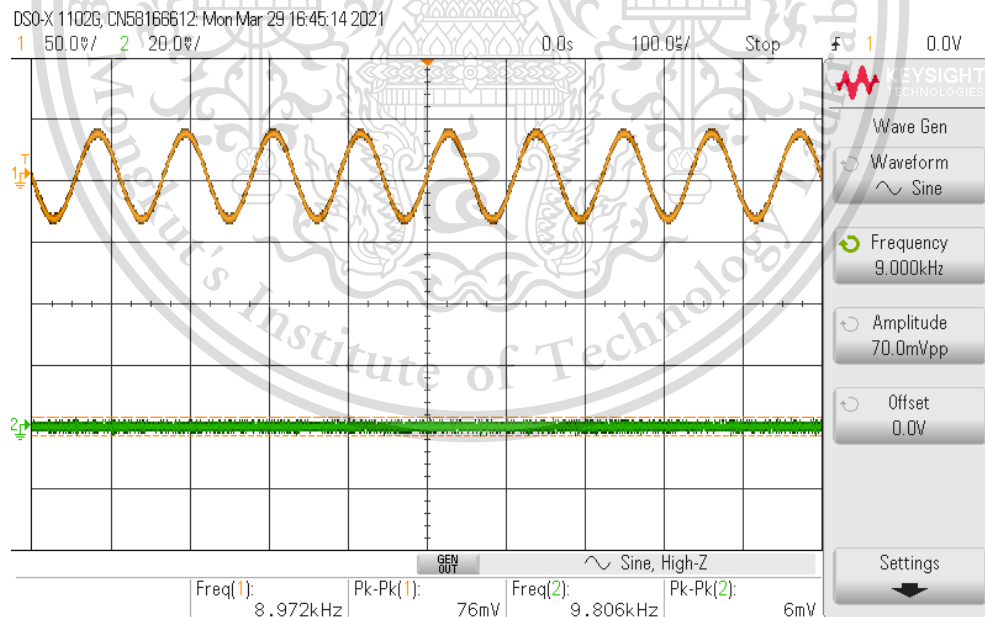
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.30 ทดสอบที่ความถี่ 8 kHz

จากรูปที่ 2.30 จะเห็นว่าที่ความถี่ 8 kHz สัญญาณ Output ผ่านออกมาได้ แต่มีขนาดแอมพลิจูดน้อยมากเมื่อเทียบสัญญาณ input เนื่องจากที่ความถี่ 8 kHz ที่ความถี่ที่  $F_s/2$

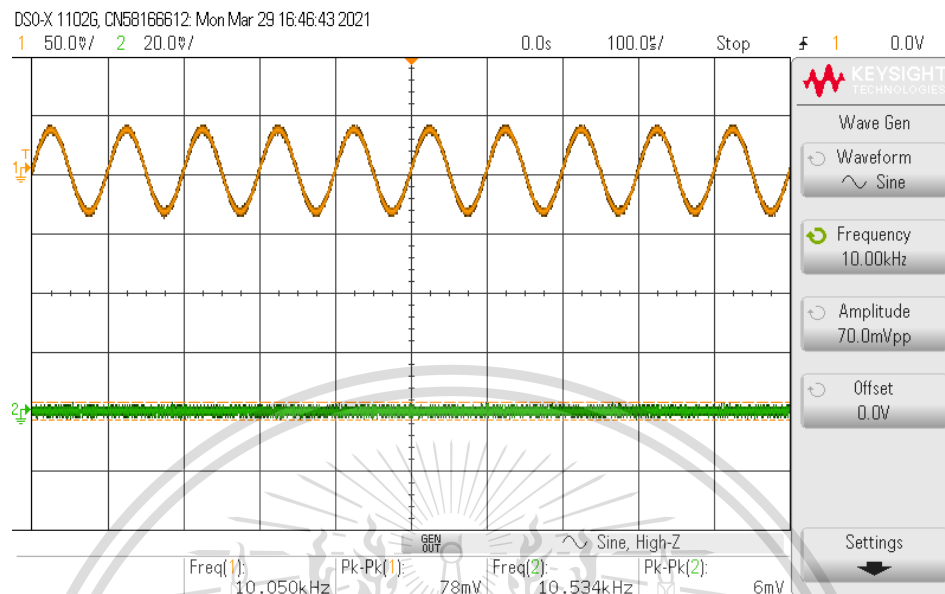


รูปที่ 2.31 ทดสอบที่ความถี่ 9 kHz

จากรูปที่ 2.31 จะเห็นว่าที่ความถี่ 9 kHz สัญญาณ Output แทบผ่านออกมาไม่ได้ จึงทำ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ให้มีขนาดแอมพลิจูดน้อยมากเมื่อเทียบสัญญาณ input เนื่องจากเลยความถี่ที่  $F_s/2$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.32 ทดสอบที่ความถี่ 10 kHz

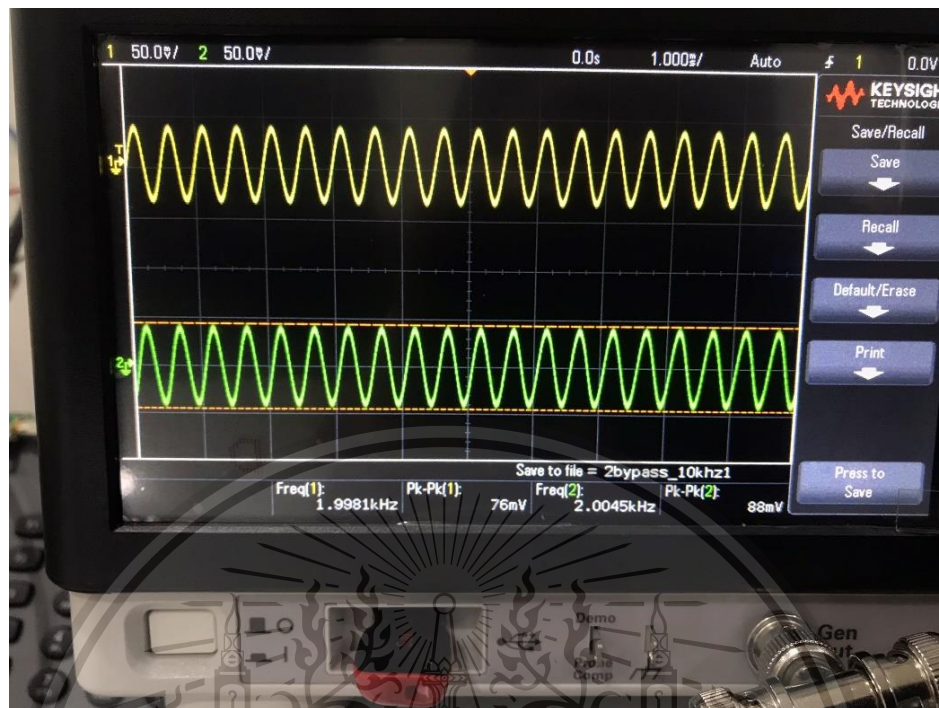
จากรูปที่ 2.32 จะเห็นว่าที่ความถี่ 10 kHz สัญญาณ Output แทบผ่านออกมาไม่ได้ จึงทำให้มีขนาดแอมพลิจูดน้อยมากเมื่อเทียบสัญญาณ input เนื่องจากเลขความถี่ที่  $F_s/2$  เหมือนกับที่ความถี่ 9 kHz

14. เครื่อง Oscilloscope สามารถ save รูปหน้าจอที่แสดงบนเครื่องได้โดยกดที่ปุ่ม save/Recall ดังรูปที่ 2.33 – 2. โดยที่เสียบแฟลชไดรฟ์ในช่องเสียบที่อยู่ด้านหน้าตัวเครื่องแต่ต้องทำการ format แฟลชไดรฟ์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

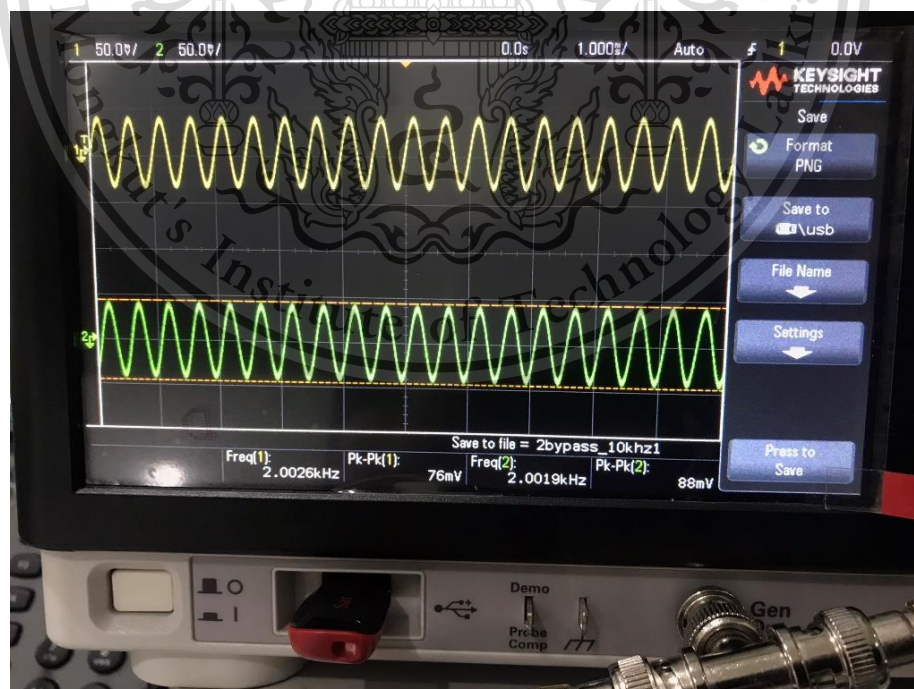
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.33 การบันทึกภาพหน้าจอเครื่อง Oscilloscope (1)

จากรูปที่ 2.33 ทำการกดที่ปุ่ม save แล้วจะเปลี่ยนหน้าต่างเป็นดังรูปที่ 2.34



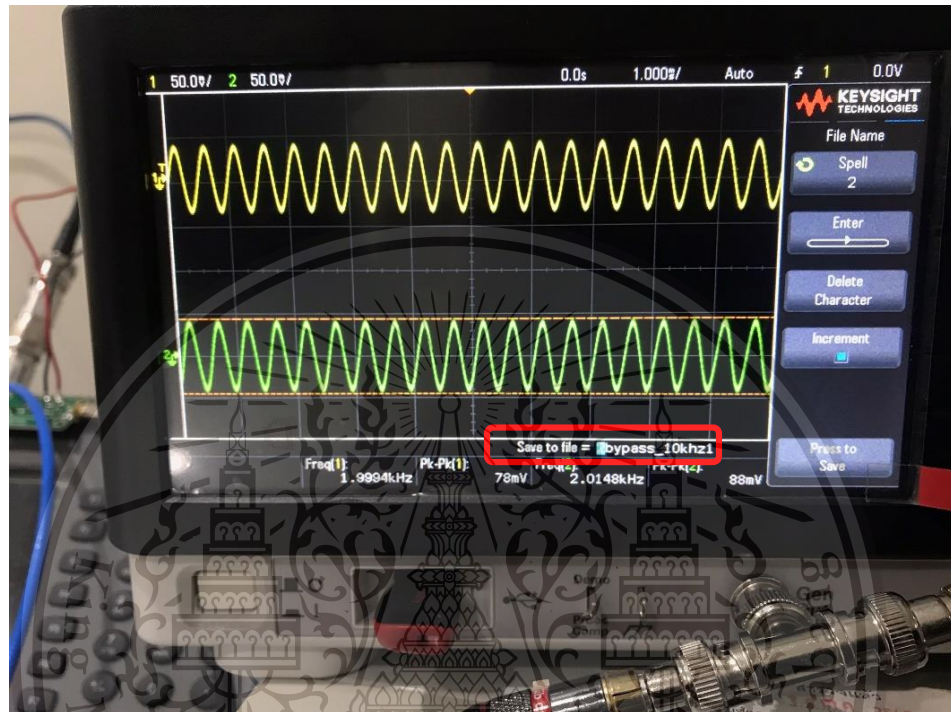
รูปที่ 2.33 การบันทึกภาพหน้าจอเครื่อง Oscilloscope (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 2.33 ในส่วนของ format สามารถเลือกได้ว่าจะบันทึกภาพเป็นสกุลไฟล์ต่างๆได้, ในส่วนของ Save to เลือก USB ให้ตรงกับที่เสียบ และในส่วนของ File name สามารถตั้งชื่อไฟล์ได้ ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 การบันทึกภาพหน้าจอเครื่อง Oscilloscope (3)

จากรูปที่ 2.34 ในส่วนของ Spell จะเป็นการเลือกตัวอักษรทีละตัวที่อยู่ในกรอบสีแดงหรือกรอบในรูปที่ 2.34 ทำการเลือกตัวอักษรโดยการหมุนปุ่ม Entry แล้วกดที่ปุ่มนั้น, ในส่วนของ Enter จะเป็นการเลื่อนตำแหน่งของอักษรทีละตัวและในส่วนของ Delete Character จะเป็นการลบอักษรทีละตัว จากนั้นกด Press to save จากนั้นจะทำการบันทึกรูปหน้าจอลง USB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

#### FIR Implement

##### Kaiser window function

เป็น window function ที่สามารถปรับคุณลักษณะได้ หรือ Adjustable window ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาของ Fixed window ได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเกิด ripples ได้ด้วย ซึ่งปริยญาณิพนธ์นี้ใช้ในการออกแบบ FIR filter โดยสมการของ Kaiser window กำหนดดังสมการที่ 3.1

$$w(n) = \begin{cases} \frac{I_0 \left\{ \beta \left[ 1 - \left( \frac{2n}{N-1} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}}{I_0 \beta} & ; -(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2 \\ 0 & ; elsewhere \end{cases} \quad (3.1)$$

โดยค่า zero-order modified Bessel function of the first kind หรือ  $I_0(x)$  สามารถหาได้โดยใช้ power series expansion ดังสมการที่ 3.2

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^L \left[ \frac{(x/2)^k}{k!} \right]^2 ; L \rightarrow \infty \quad (3.2)$$

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า Kaiser window สามารถควบคุมการเกิด ripples ได้ซึ่งสามารถทำได้เนื่องจากมีตัวแปรที่เรียกว่า ripple control parameter,  $\beta$  โดยค่า  $\beta$  จะถูกกำหนดจากค่า Stopband attenuation ที่ต้องการ สามารถประมาณค่า  $\beta$  ได้จากความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันดังสมการที่ 3.3

$$\beta = 0 \quad \text{ถ้า } A \leq 21 \text{ dB} \quad (3.3a)$$

$$\beta = 0.5842(A-21)^{0.4} + 0.07886(A-21) \quad \text{ถ้า } 21 \text{ dB} \leq A \leq 50 \text{ dB} \quad (3.3b)$$

$$\beta = 0.1102(A-8.7) \quad \text{ถ้า } A \geq 50 \text{ dB} \quad (3.3c)$$

โดย  $A$  คือค่า stopband attenuation หาได้จากสมการที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (3.4)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\text{และ } \delta = \min(\delta_p, \delta_s) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\delta_p$  คือ passband ripple

$\delta_s$  คือ stopband ripple

จำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ หรือ filter length หาได้จากสมการที่ 3.6 ซึ่งหากค่าที่ได้เป็นเลขทศนิยมให้ปัดทศนิยมขึ้นทุกกรณี

$$N \geq \frac{A - 7.95}{14.36(\Delta f / F_s)} \quad (3.6)$$

ค่า  $\beta$  และ  $N$  จะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ Kaiser window ปริมาณนี้ทำการออกแบบฟิลเตอร์ 4 ประเภท โดยใช้คุณลักษณะร่วมกันดังนี้

กำหนดให้ Transition width ( $\Delta f$ ) 1.1 kHz

Sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation (A) 60 dB

จากข้อกำหนดดังกล่าว หาค่า passband ripple และ stopband ripple ได้จากสมการที่ 3.7 และ 3.8 ซึ่งได้ค่า passband ripple เท่ากับ 0.0115 และค่า stopband ripple เท่ากับ 0.001

$$\delta_p (dB) = 20 \log_{10}(1 - \delta_p) \quad (3.7)$$

$$\delta_s (dB) = -20 \log_{10}(\delta_s) \quad (3.8)$$

ดังนั้น จะได้ค่า  $\delta$  จากสมการที่ 3.7 เท่ากับ 0.001 ซึ่งเมื่อแทนในสมการที่ 3.4 จะได้  $A = 60$  dB ตรงตามเงื่อนไขสมการที่ 3.3c เมื่อนำค่า Stopband attenuation ที่ได้แทนในสมการที่ 3.3c และ สมการที่ 3.6 จะได้ค่า  $\beta$  และ  $N$  ที่ใช้สำหรับการออกแบบและคำนวณ window function,  $w(n)$  วิธีการได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ฟิลเตอร์ เหมือนกับการออกแบบด้วย window function อื่น ๆ โดยจะได้ค่า  $\beta = 5.6533$  และ  $N = 53$  จากค่าตัวแปรเหล่านี้

วิธี Kaiser window function สามารถนำไปใช้ในการออกแบบฟิลเตอร์แบบ FIR ได้ทั้ง 4 ประเภท คือ Lowpass filter, Highpass filter, Bandpass filter และ Bandstop filter โดยในส่วนของ การออกแบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้

### 3.1.1 การออกแบบ FIR filter ด้วย Matlab

เป็นการออกแบบ FIR filter ด้วยวิธี Kaiser window function โดยจะนำเอา

หลักการและทฤษฎีข้างต้นมาทำการเขียนโปรแกรมใน Matlab ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1.1.1 FIR Lowpass filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 2 kHz โดยจาก ทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังนี้

```

N = 53;
beta = 5.6533;
Fs = 16000;
fp = 2000;
wp = (2*pi*fp)/Fs;
hd0 = wp/pi;
n = -(N-1)/2:-1;
hd = sin(n.*wp)./(n.*pi);
h_ideal = [hd hd0 fliplr(hd)];
i = 1;
for n = -(N-1)/2:(N-1)/2
    num_arg = beta*sqrt(1-(2*n/(N-1))^2);
    w(i) = I0(num_arg)/I0(beta);
    i=i+1;
end;
h = h_ideal.*w;
[H,q] = freqz(h,1,512,Fs);

figure(1);
plot(q,20.*log10(abs(H)));
xlabel('Frequency in Hz');ylabel('Amplitude in dB');grid;
title('Amplitude response in dB of Kaiser window')

figure(2);
plot(q,abs(H));
xlabel('Frequency in Hz');ylabel('Magnitude');grid;
title('Magnitude response in dB of Kaiser window')

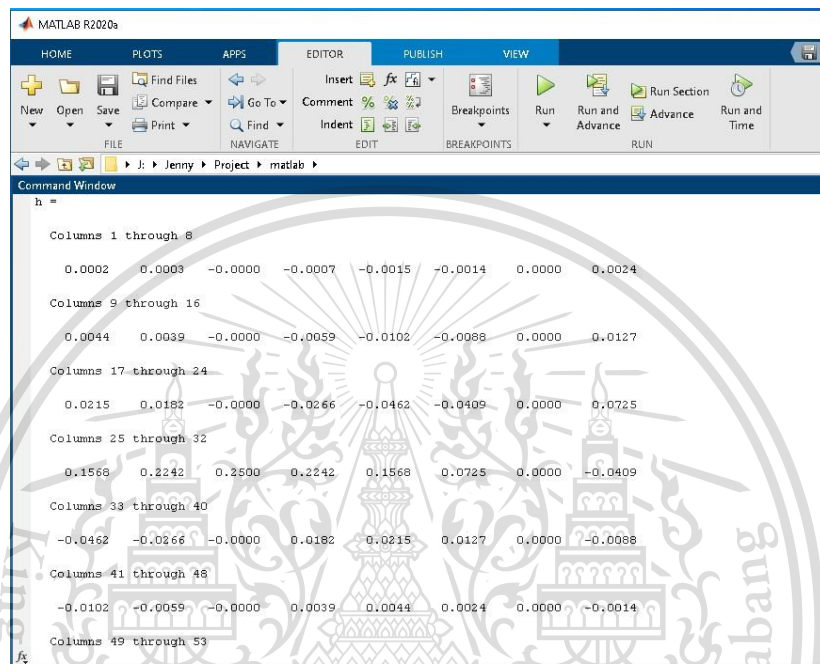
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

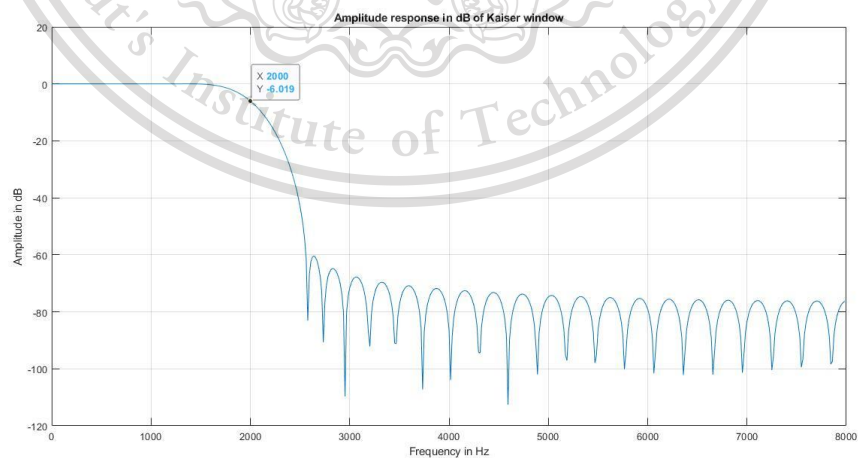
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Lowpass filter และ Amplitude response ในหน่วย dB ซึ่งแสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function.



รูปที่ 3.2 Amplitude response ของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้

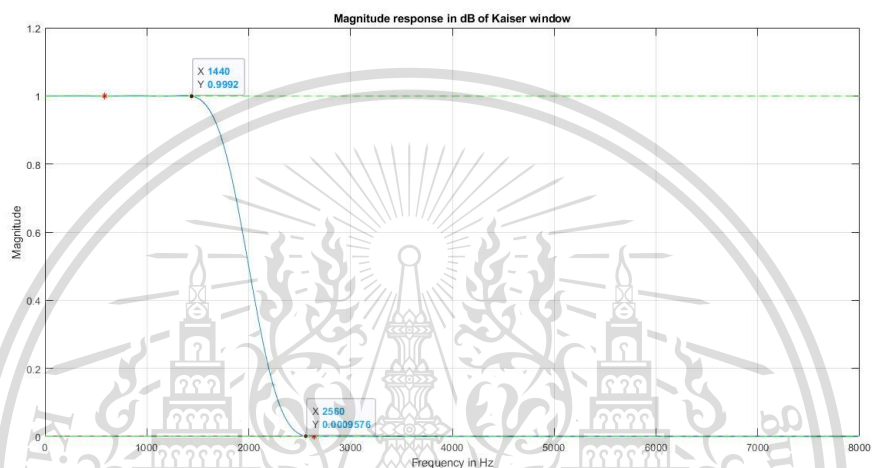
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และจะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณส่วนที่เป็น stopband attenuation มีค่าต่ำกว่า -60 dB ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ อีกหนึ่งคุณลักษณะที่กำหนดไว้ คือ Transition width เท่ากับ 1.1 kHz ซึ่งเมื่อทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.3 Transition band จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1440 Hz ถึง 2560 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1120 Hz ใกล้เคียงกับคุณลักษณะข้างต้น



รูปที่ 3.3 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

### 3.1.1.2 FIR Highpass filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 5.5 kHz โดยจาก ทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังนี้

```
N = 53;
beta = 5.6533;
Fs = 16000;
fp = 5500;
wp = (2*pi*fp)/Fs;
hd0 = 1-(wp/pi);
n = -(N-1)/2:-1;
```

```
hd = sin(n.*wp)/(n.*pi);
h_ideal = [hd hd0 fliplr(hd)];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ไม่มีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use

```

i = 1;
for n = -(N-1)/2:(N-1)/2
    num_arg = beta*sqrt(1-(2*n/(N-1))^2);
    w(i) = I0(num_arg)/I0(beta)
    i = i+1;
end;
h = h_ideal.*w
[H,q] = freqz(h,1,512,Fs);

figure(1);
plot(q,20.*log10(abs(H)));
xlabel('Frequency in Hz');ylabel('Amplitude in dB');grid;
title('Amplitude response in dB of Kaiser window')

figure(2);
plot(q,abs(H));
xlabel('Frequency in Hz');ylabel('Magnitude');grid;
title('Magnitude response in dB of Kaiser window')

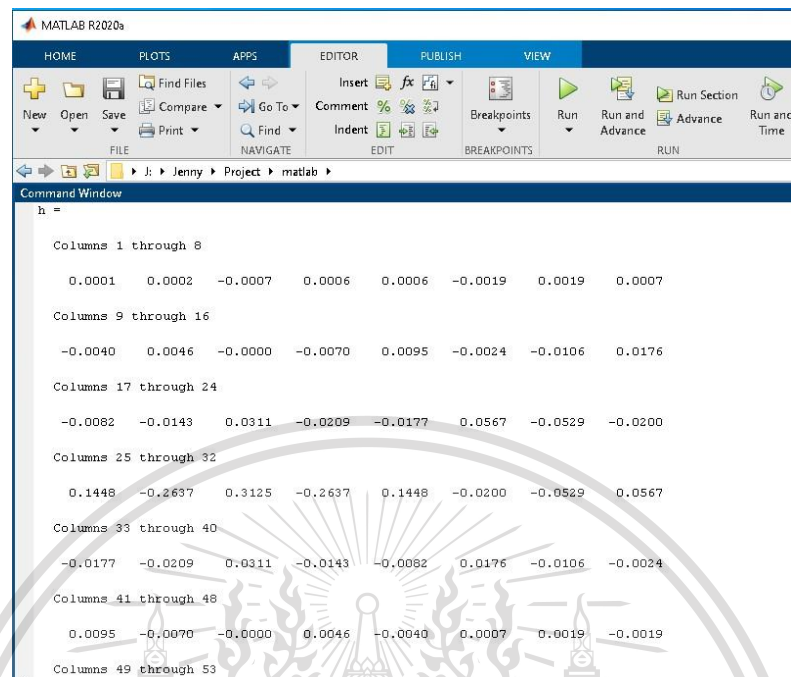
```

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Highpass filter และ Amplitude response ในหน่วย dB ซึ่งแสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

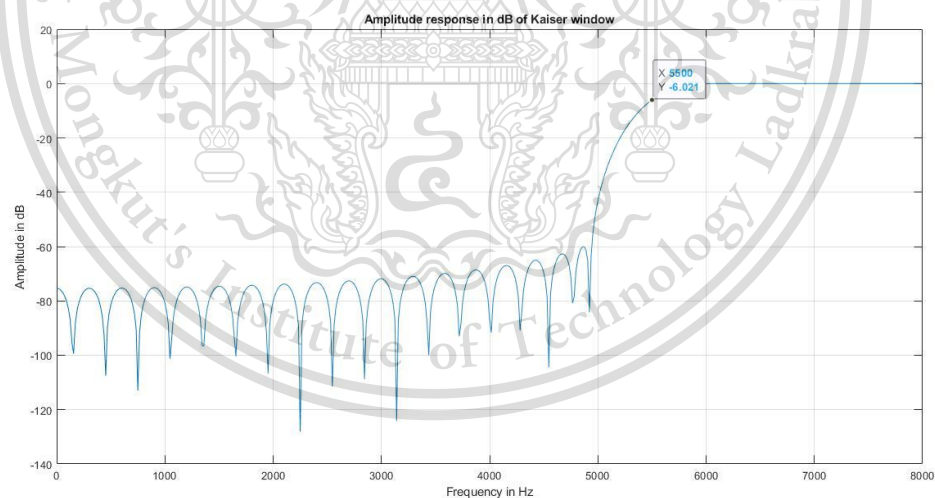
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

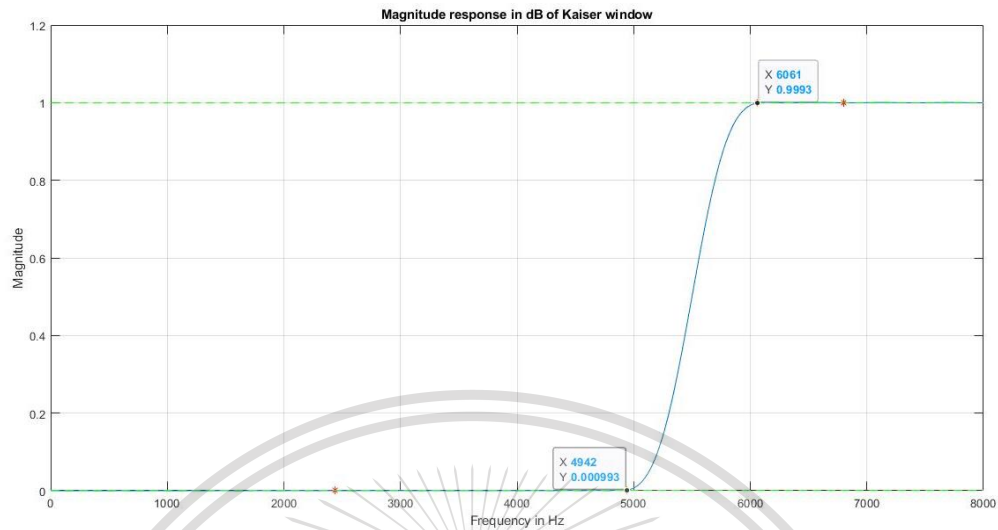


รูปที่ 3.5 Amplitude response ของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB

จากนั้นทดลองทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.6 Transition band จะอยู่ในช่วงระหว่าง 4942 Hz ถึง 6061 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1119 Hz ใกล้เคียงกับคุณลักษณะข้างต้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.6 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

### 3.1.1.3 FIR bandpass filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 3.5 kHz และ 5 kHz โดยจากทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังนี้

```
N = 53;
beta = 5.6533;
Fs = 16000;
fp1 = 3500;
fp2 = 5000;
wp1 = (2*pi*fp1)/Fs;
wp2 = (2*pi*fp2)/Fs;
hd0 = (wp2-wp1)/pi;
n = -(N-1)/2:-1;
hd = (sin(n.*wp2)-sin(n.*wp1))./(n.*pi);
h_ideal = [hd hd0 fliplr(hd)];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

i = 1;
for n = -(N-1)/2:(N-1)/2
    num_arg = beta*sqrt(1-(2*n/(N-1))^2);
    w(i) = I0(num_arg)/I0(beta)
    i =i+1;
end;

h = h_ideal.*w
[H,q] = freqz(h,1,512,Fs);

figure(1);
plot(q,20.*log10(abs(H)));
xlabel('Frequency in Hz');ylabel('Amplitude in dB');grid;
title('Amplitude response in dB of Kaiser window')

figure(2);
plot(q,abs(H));
xlabel('Frequency in Hz');ylabel('Magnitude ');grid;axis([0 8000 -0.2 1.2])
title('Magnitude response in dB of Kaiser window')

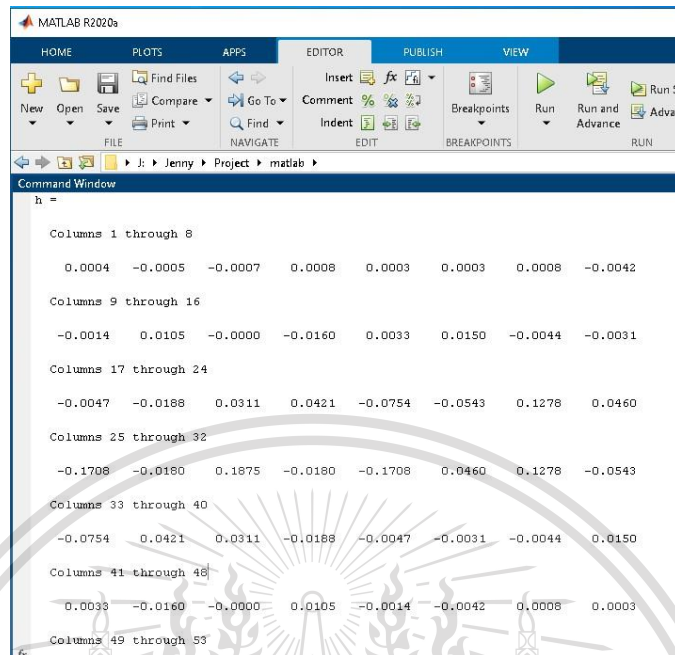
```

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Bandpass filter และ Amplitude response ในหน่วย dB ซึ่งแสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

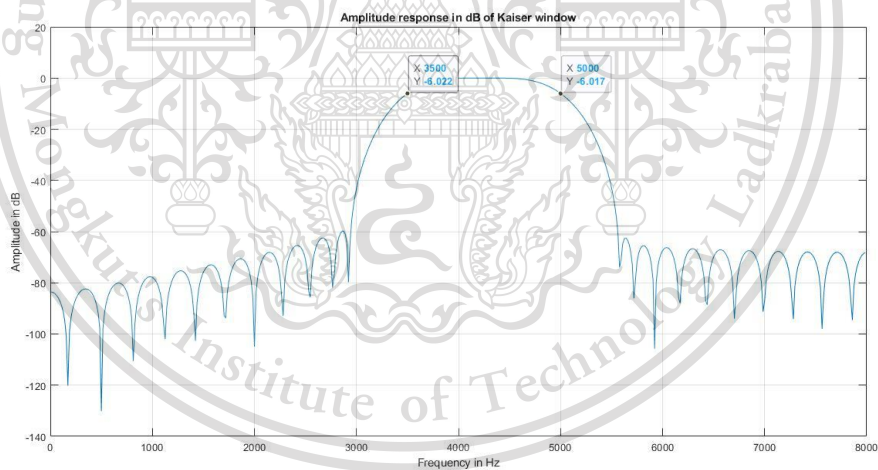
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

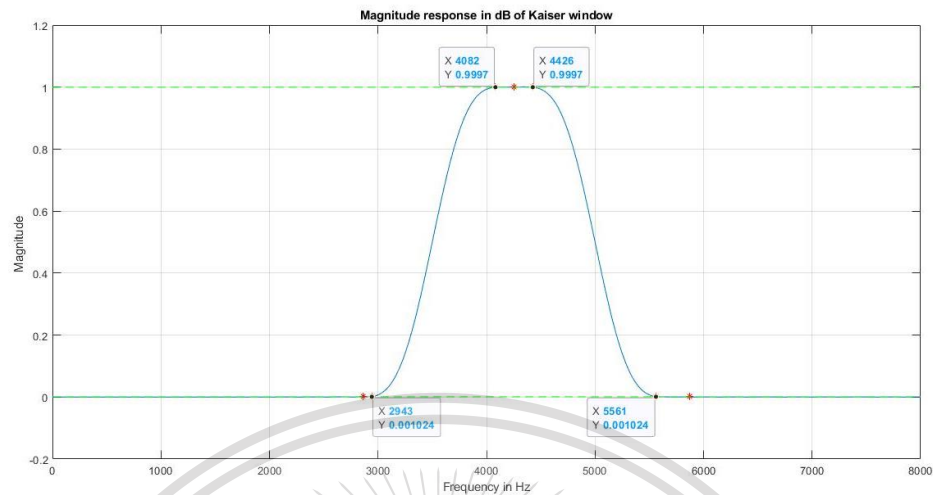


รูปที่ 3.8 Amplitude response ของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB

จากนั้นทดลองทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.9 ซึ่ง bandpass filter มี Transition band 2 ช่วง จากรูปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2943 Hz ถึง 4082 Hz และ ในช่วงระหว่าง 4426 Hz ถึง 5561 Hz จะได้เอกสารนี้เป็น Transition width เท่ากับ 1139 Hz และ 1135 Hz ตามลำดับ มอนูญตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

#### 3.1.1.4 FIR bandstop filter

กำหนดตำแหน่ง passband edge frequency อยู่ที่ 1.5 kHz และ 5.5 kHz โดยจากทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังนี้

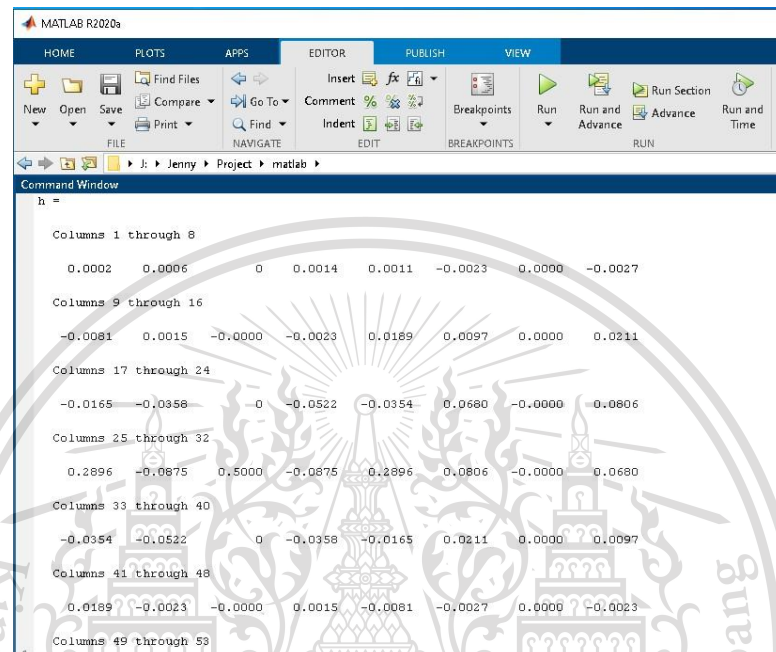
```
N = 53;
Fs = 16000;
fp1 = 1500;
fp2 = 5500;
wp1 = (2*pi*fp1)/Fs;
wp2 = (2*pi*fp2)/Fs;
hd0 = 1-((wp2-wp1)/pi);
n = -(N-1)/2:-1;
hd = (sin(n.*wp1)-sin(n.*wp2))./(n.*pi);
h_ideal = [hd hd0 fliplr(hd)];
n = -(N-1)/2:(N-1)/2;
Hann_window = 0.5+0.5*cos(2*pi.*n/N);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

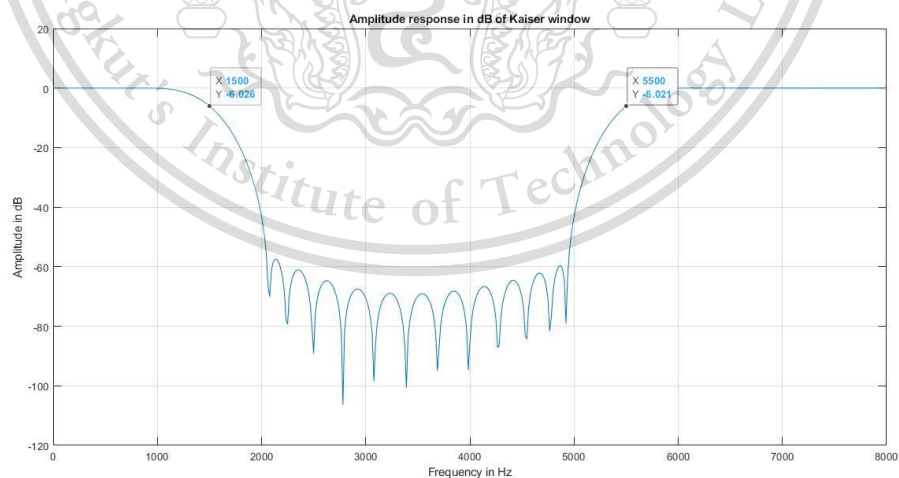
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Bandstop filter และ Amplitude response ในหน่วย dB ซึ่งแสดงให้เห็นค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ดังกล่าว มีค่าเท่ากับ -6 dB ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function



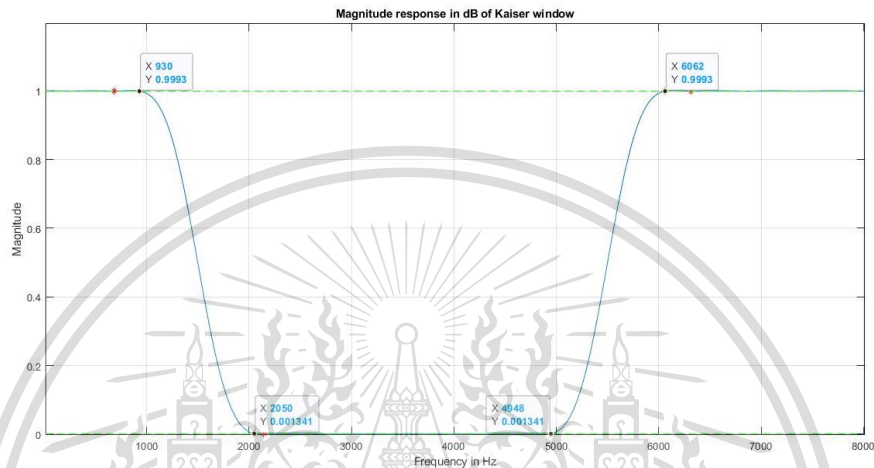
รูปที่ 3.11 Amplitude response ของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function ในหน่วย dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทดลองทำการวัด Transition width จาก Amplitude response เชิงเส้นดังรูปที่ 3.12 ซึ่ง bandstop filter มี Transition band 2 ช่วงเช่นเดียวกับ bandpass filter จากรูปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 930 Hz ถึง 2050 Hz และ ในช่วงระหว่าง 4948 Hz ถึง 6062 Hz จะได้ Transition width เท่ากับ 1120 Hz และ 1114 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 Amplitude response เชิงเส้นของ FIR bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser window function

จากผลการออกแบบฟิลเตอร์ด้วย Kaiser window เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก fixed window function ก่อนหน้า จะเห็นได้ว่าฟิลเตอร์ที่ออกแบบด้วย Kaiser window สามารถกำหนดคุณลักษณะจำเพาะของฟิลเตอร์ได้ ทำให้ได้ฟิลเตอร์ตามคุณสมบัติที่ผู้ทำการออกแบบต้องการมากกว่าการใช้ window function อื่น

### 3.1.2 การออกแบบ FIR filter ด้วย Simulink และ M-file

เป็นการออกแบบ FIR filter ด้วยวิธี Kaiser window function โดยจะนำเอาหลักการและทฤษฎีข้างต้นมาทำการต่อบล็อก Simulink และสร้าง M-file ใน Matlab ดังนี้

#### 3.1.2.1 Simulink

เป็นการออกแบบ FIR filter ทั้ง 4 ชนิดด้วยการต่อบล็อก Simulink แบบสำเร็จในโปรแกรม Matlab ดังนี้

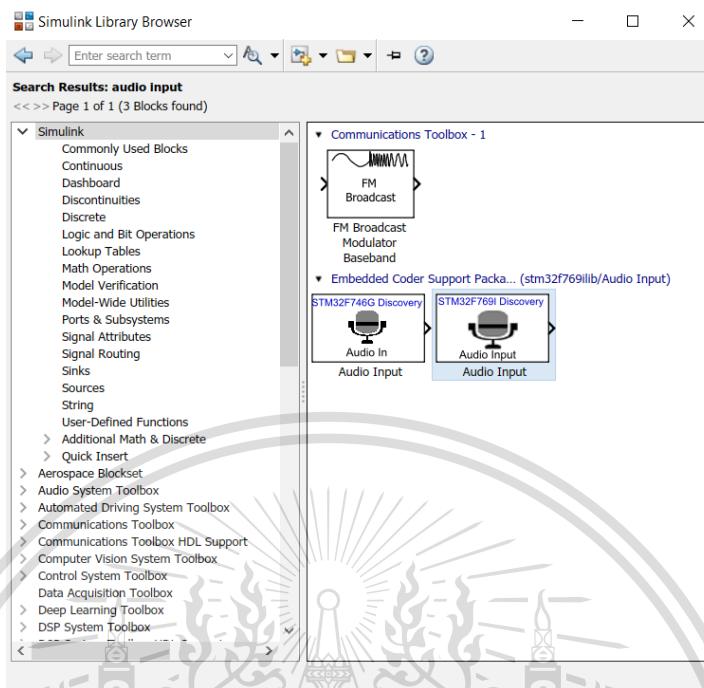
##### 1) FIR Lowpass filter

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Audio Input แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Input ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นให้

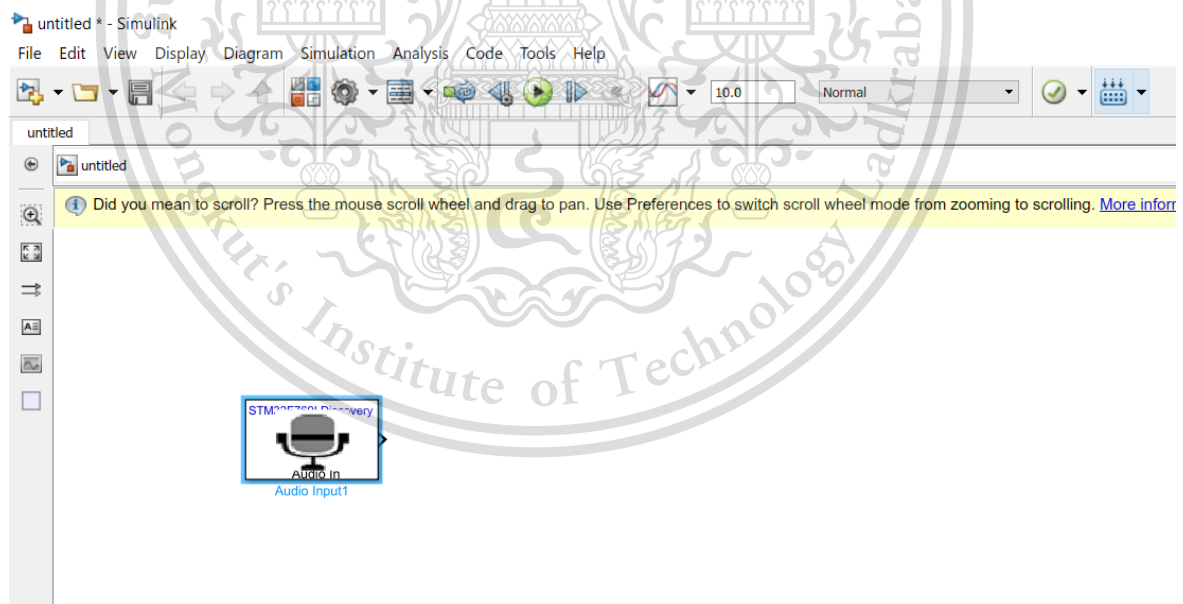
ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 3.14

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.13 บล็อก Audio Input

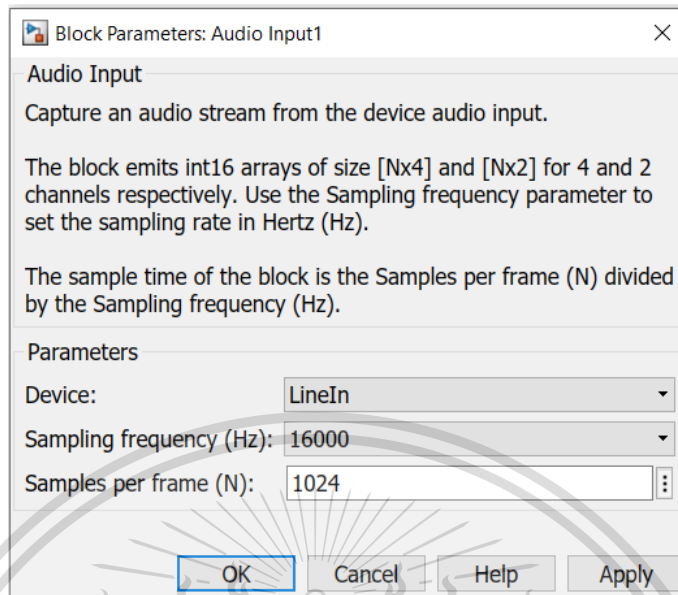


รูปที่ 3.14 ลากบล็อก Audio Input ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานการค้า  
 ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Input โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 16,000 Hz, Device เป็น LineIn และ Samples per frame เป็น 1024 ดังรูปที่ 3.15  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

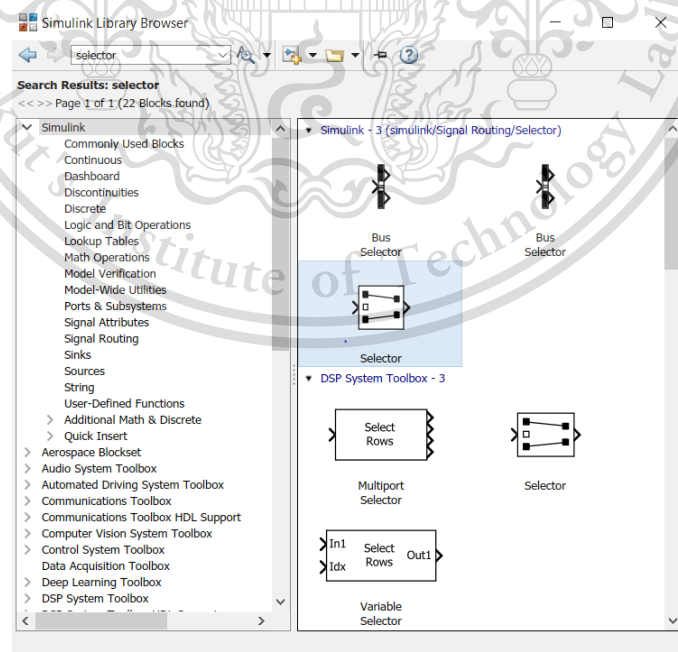
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.15 การตั้งค่าบล็อก Audio Input

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Selector แล้วทำการเลือกบล็อก Selector ดังรูปที่ 3.16 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector ดังรูปที่ 3.17

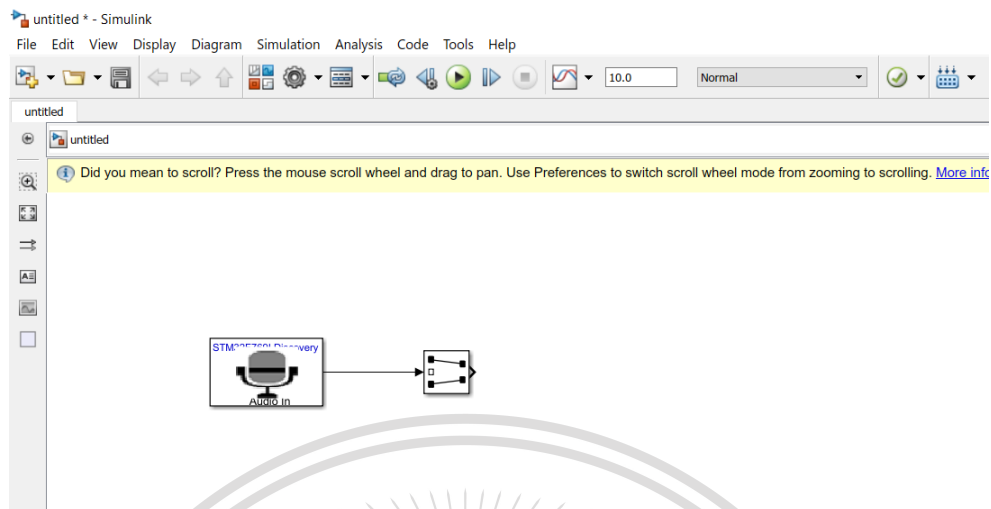


รูปที่ 3.16 บล็อก Selector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระหว่างชั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

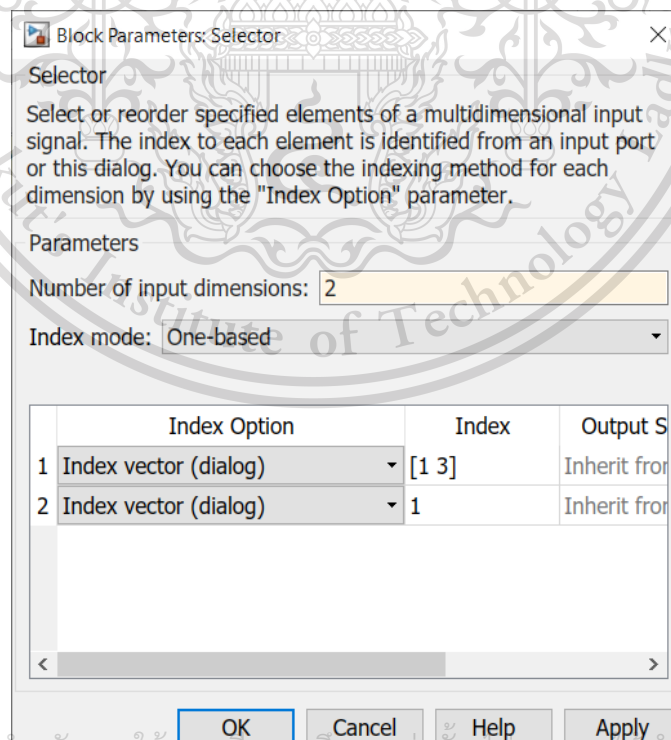
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 ลากบล็อก Selector ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector

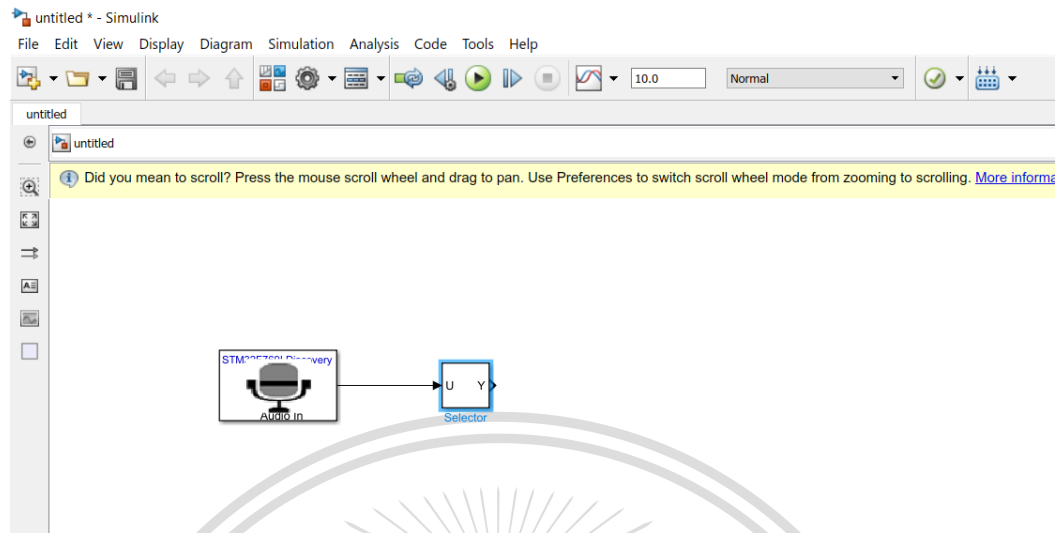
ทำการตั้งค่าบล็อก Selector โดยกำหนดให้ Number of input dimensions เป็น 2 และ Index mode เป็น One-based ดังรูปที่ 3.18 แล้วทำการกด OK จะได้ บล็อก Selector ใหม่ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังในรูปที่ 3.19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.18 การตั้งค่าบล็อก Selector  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

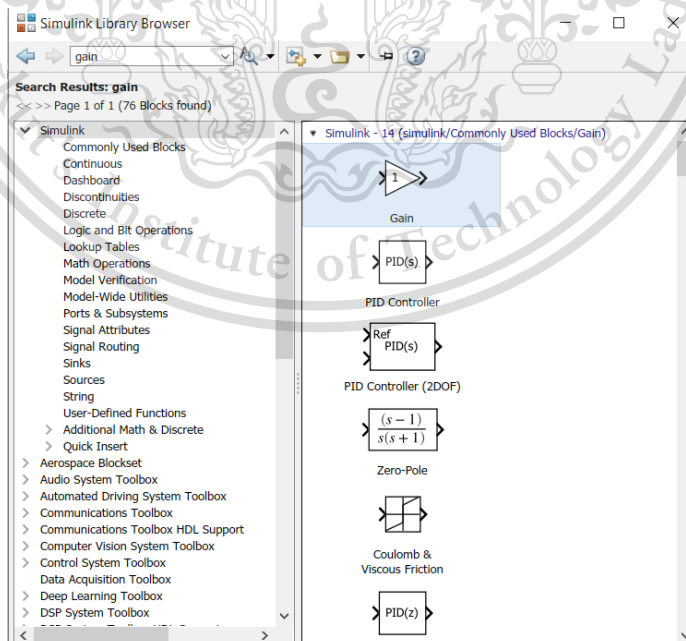
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.19 บล็อก Selector ใหม่

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 3.20 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain ดังรูปที่ 3.21



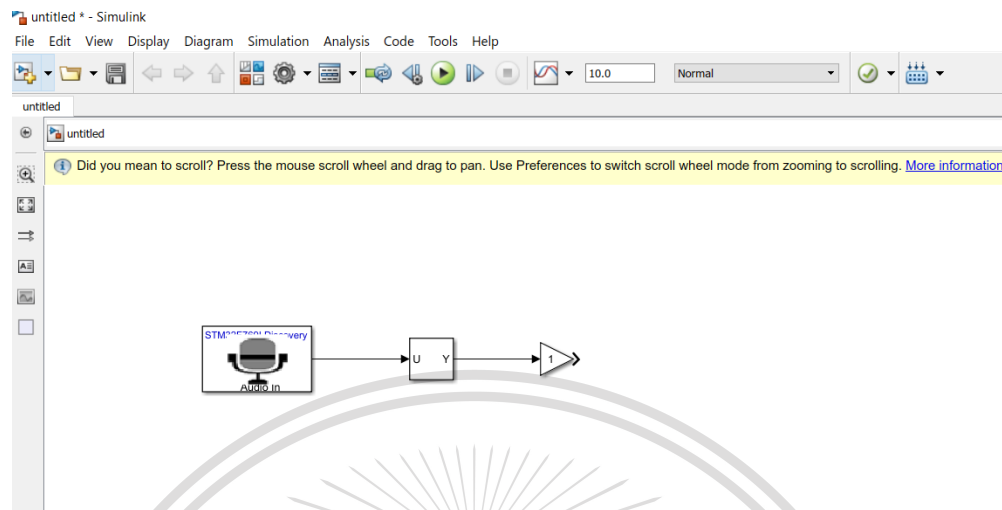
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 3.20 บล็อก Gain

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

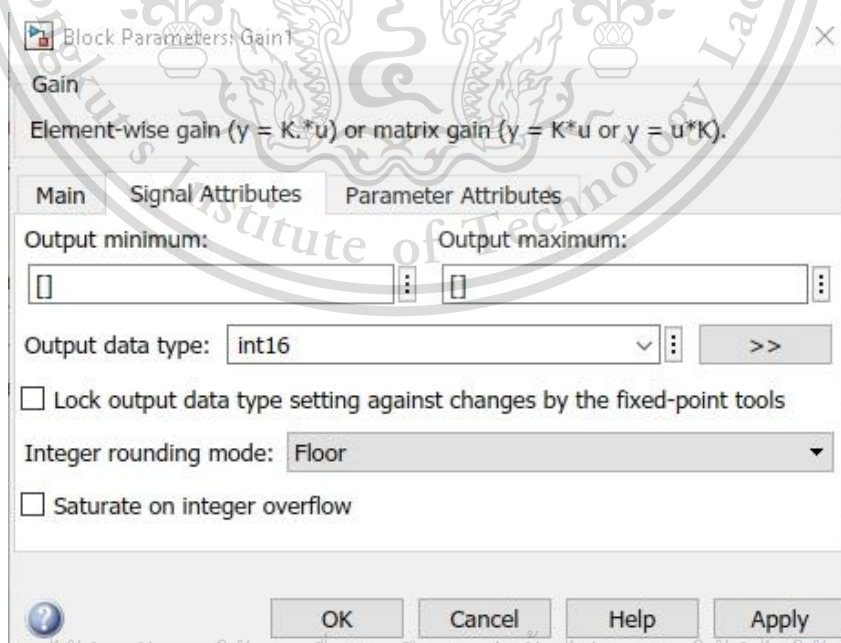
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.21 ลากบล็อก Gain ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain

ทำการตั้งค่าบล็อก Gain โดยกำหนดให้ gain เป็น 1/32768 และ Output data type เป็น int16 และ Integer rounding mode เป็น Floor ดังรูปที่ 3.22 แล้วทำการกด OK จะได้บล็อก Gain ใหม่ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังในรูปที่ 3.23



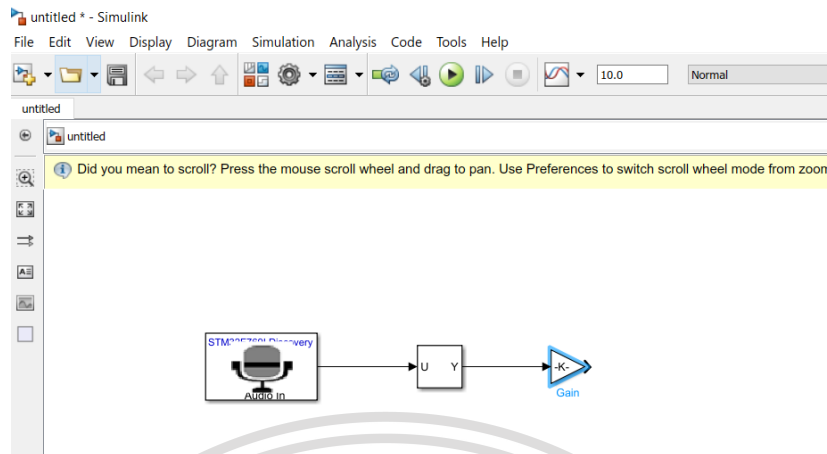
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.22 การตั้งค่าบล็อก Gain

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

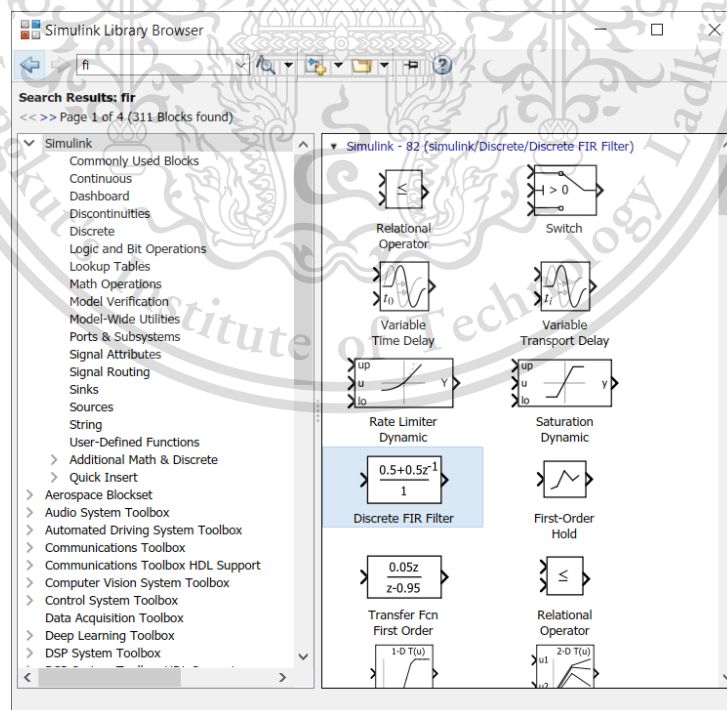
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.23 บล็อก Gain ใหม่

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า FIR Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete FIR Filter ดังรูปที่ 3.24 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete FIR Filter ดังรูปที่ 3.25

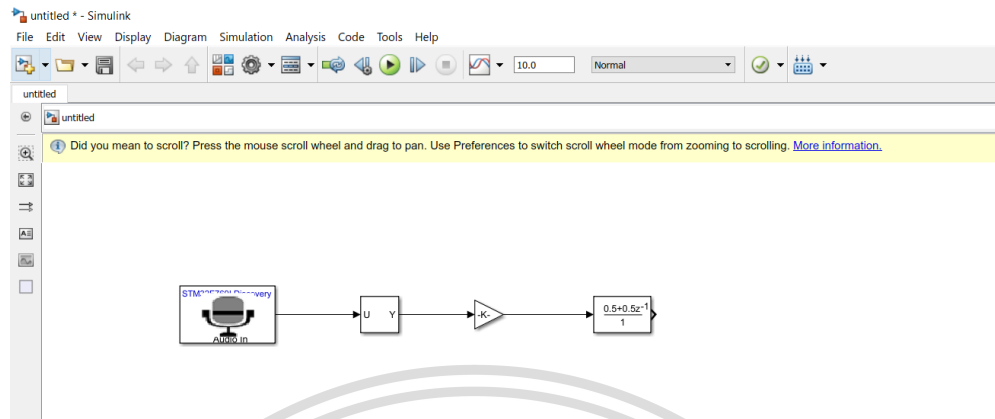


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

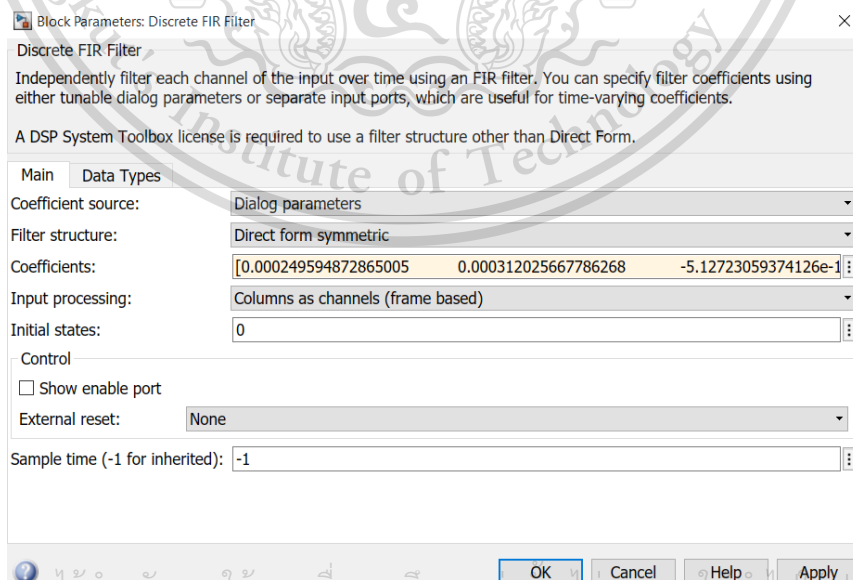
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.25 ลากบล็อก Discrete FIR Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete FIR Filter

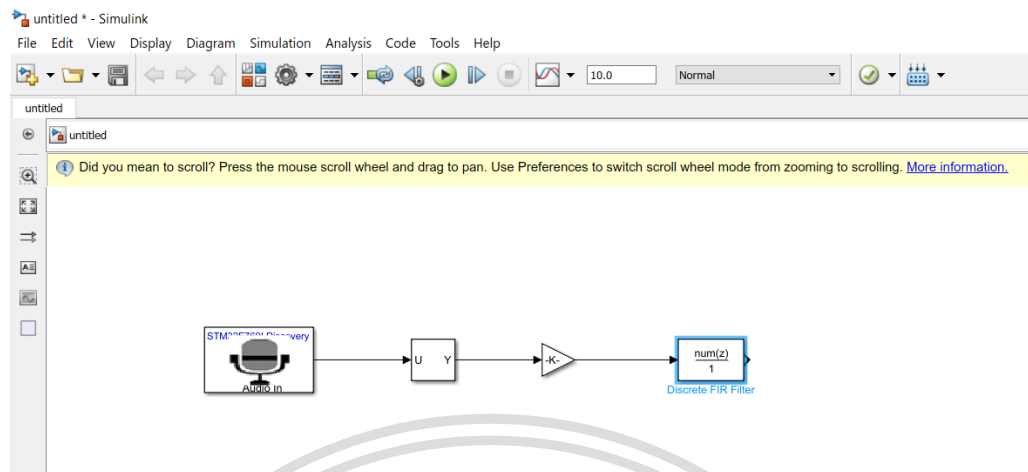
ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete FIR Filter โดยกำหนดให้ Coefficient source เป็น Dialog parameters, Filter structure เป็น Direct form symmetric, Coefficients เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Lowpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.1.1, Input processing เป็น Column as channels (frame based) และ Initial เป็น 0 ดังรูปที่ 3.26 จากนั้นทำการกด OK จะได้บล็อก Discrete FIR Filter ใหม่ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังในรูปที่ 3.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
รูปที่ 3.26 การตั้งค่าบล็อก Discrete FIR Filter

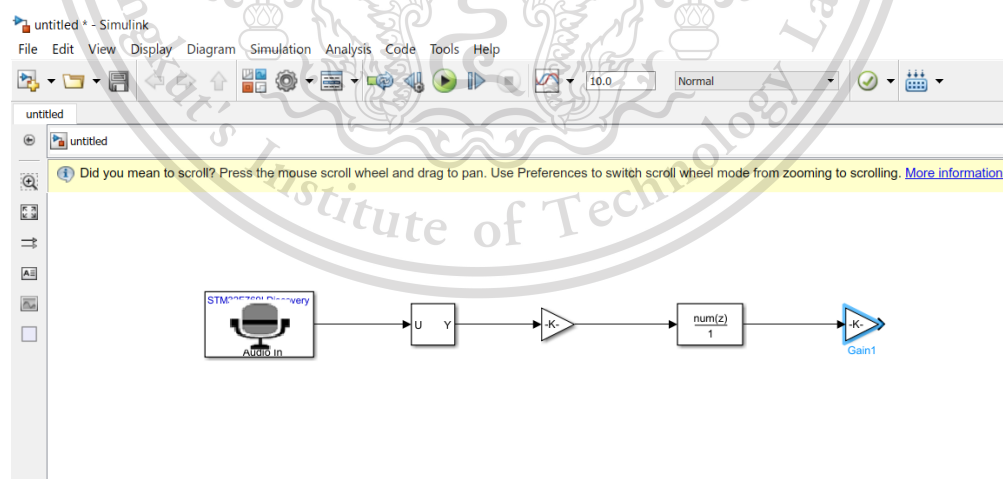
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.27 บล็อก Discrete FIR Filter ใหม่

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 3.20 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Discrete FIR Filter และ Gain ตัวที่สอง แล้วทำการตั้งค่า Gain ตัวที่สองนี้เช่นเดียวกับ Gain ตัวที่ 1 และกำหนด gain เป็น 32768 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.22 จากนั้นเมื่อทำการกด OK จะได้ Gain ตัวที่สองใหม่ ซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 3.28



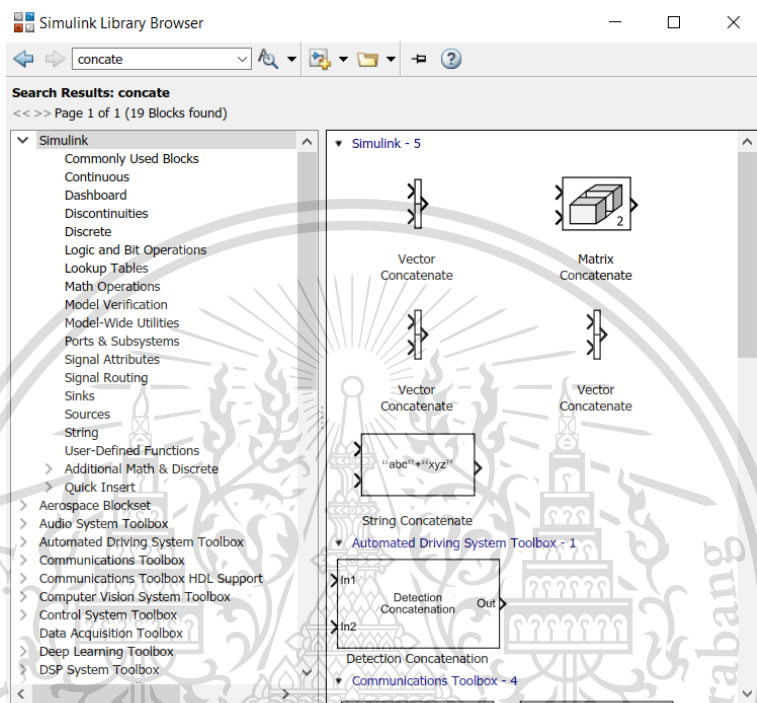
รูปที่ 3.28 บล็อก Gain ตัวที่สองใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

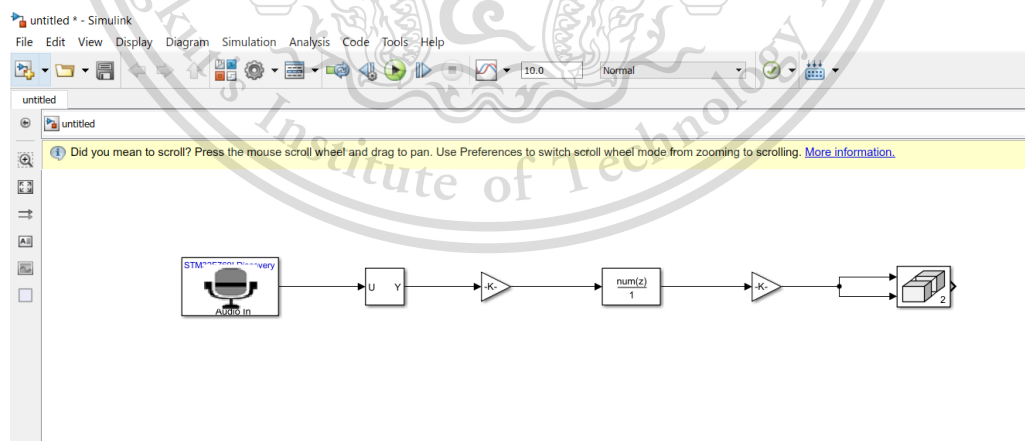
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate ดังรูปที่ 3.29 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 3.30



3.30 บล็อก Matrix Concatenate



รูปที่ 3.30 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

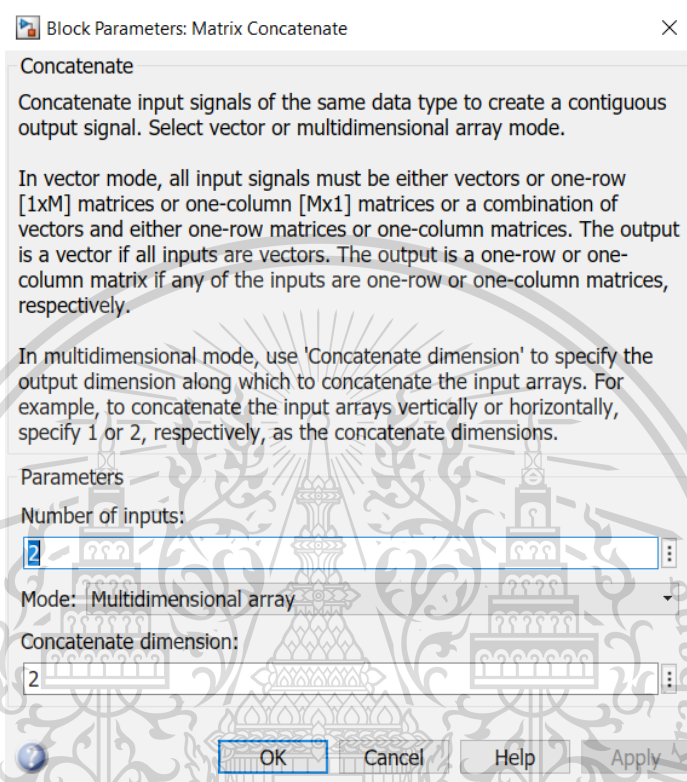
และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดให้ Number of inputs เป็น 2, Mode เป็น Multidimensional array และ Concatenate เป็น 2 ดังรูปที่ 3.31



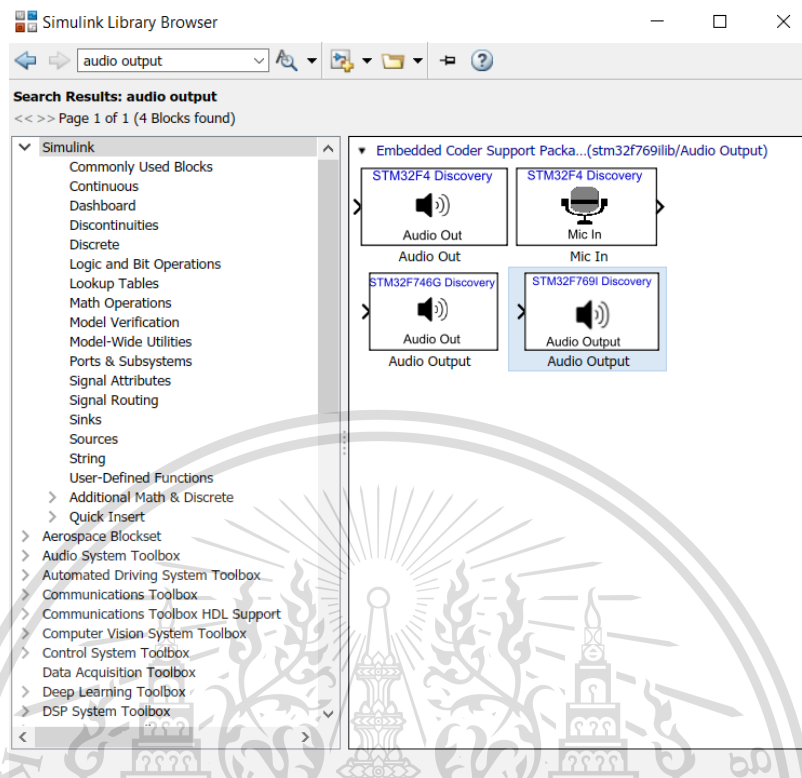
รูปที่ 3.31 การตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate

ทำการเลือกบล็อกจาก Audio Output โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหา Audio Output แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Output ดังรูปที่ 3.32 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่าง บล็อก Gian และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 3.33

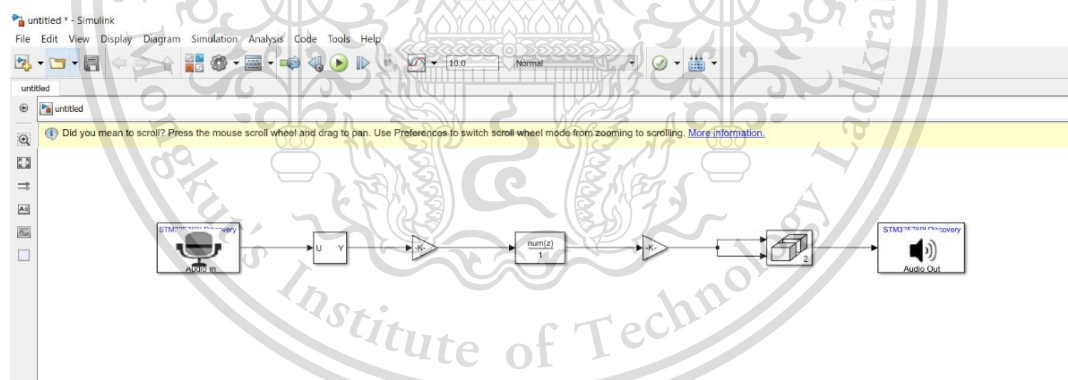
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



3.32 บล็อก Audio Output



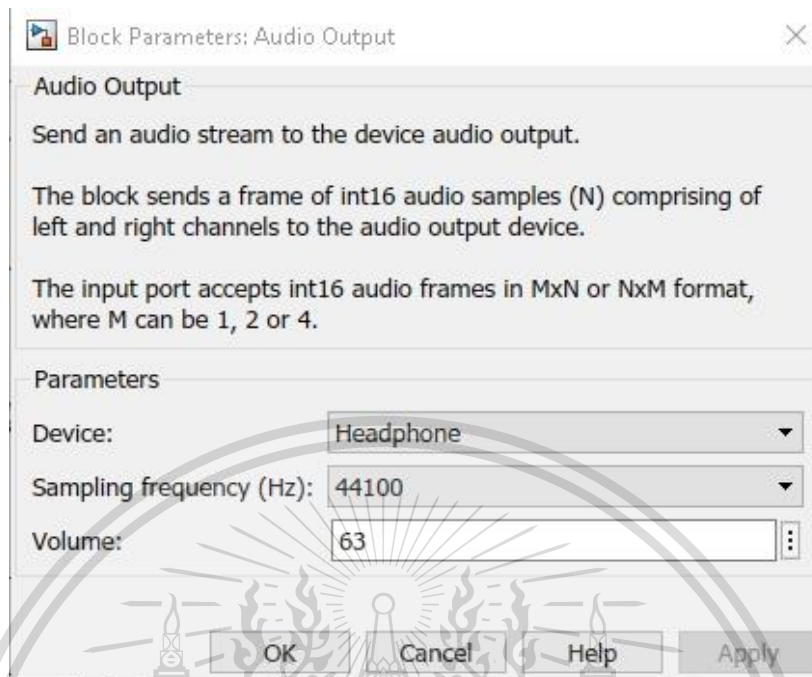
รูปที่ 3.33 ลากบล็อก Audio Output ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matrix Concatenate และ Audio Output

ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Output โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 16,000 Hz, Device เป็น Headphone และ Volume เป็น 63 ดังรูปที่ 3.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

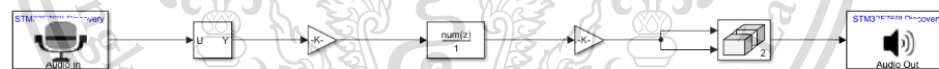
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.34 การตั้งค่าบล็อก Audio Output

จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

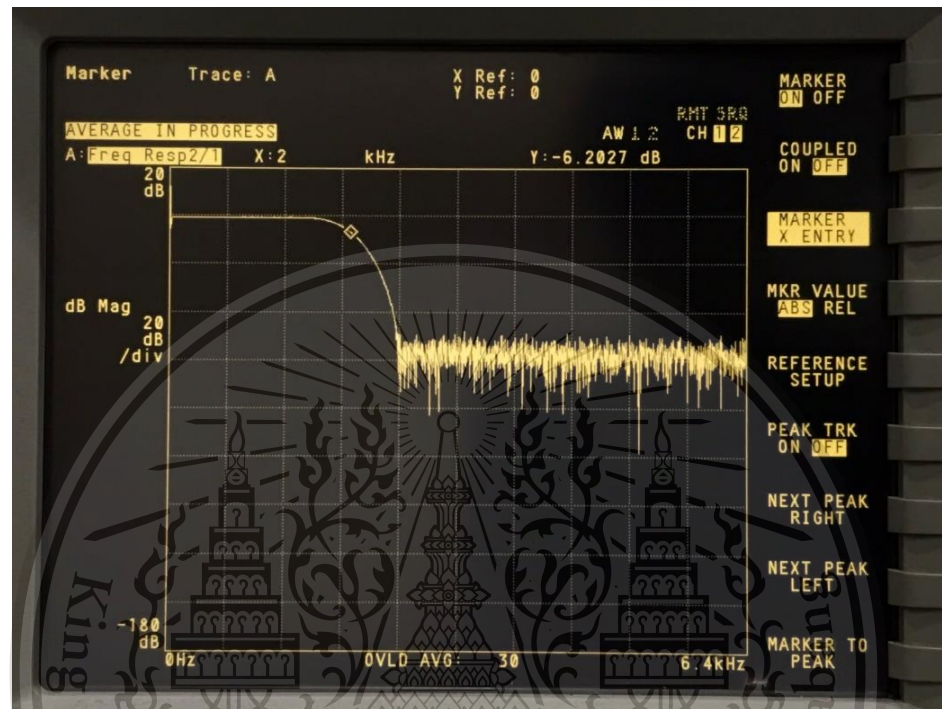
เมื่อทำการทดลอง build FIR lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.35 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.36 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

edge frequency 2 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.2027 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 3.36 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

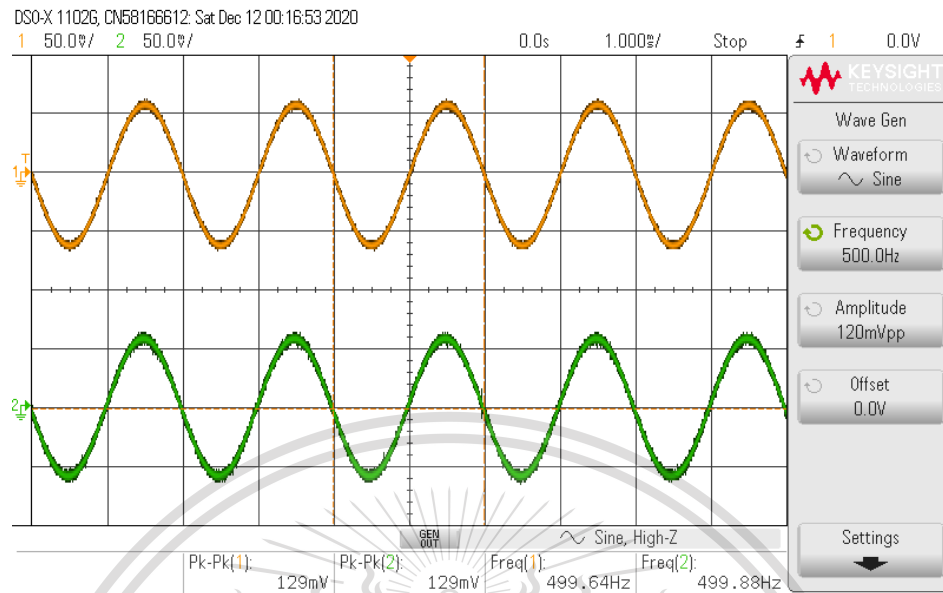
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1.1) ป้อนสัญญาณความถี่ 500 Hz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.37 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

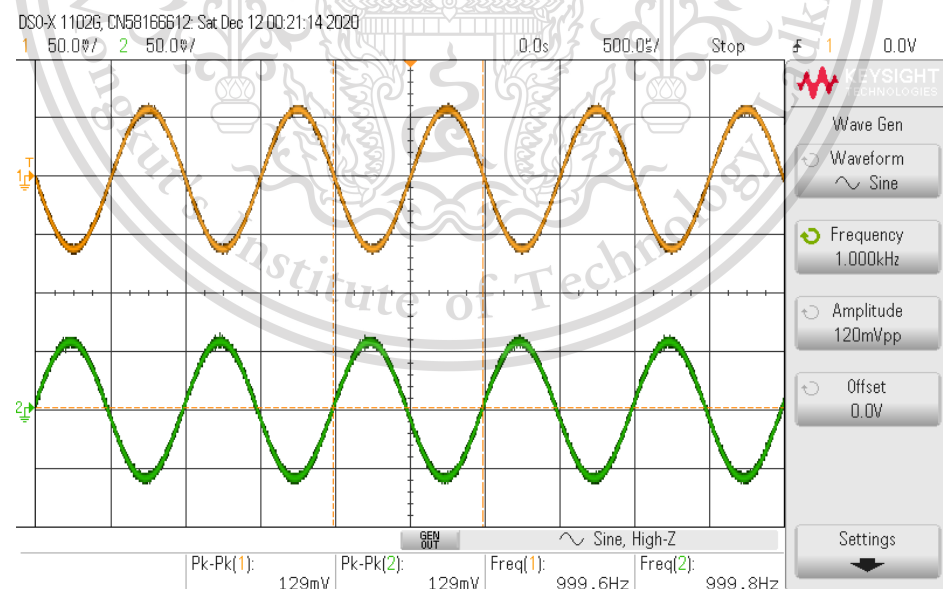
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.37 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 500 Hz ของ FIR Lowpass filter

1.2) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.38 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



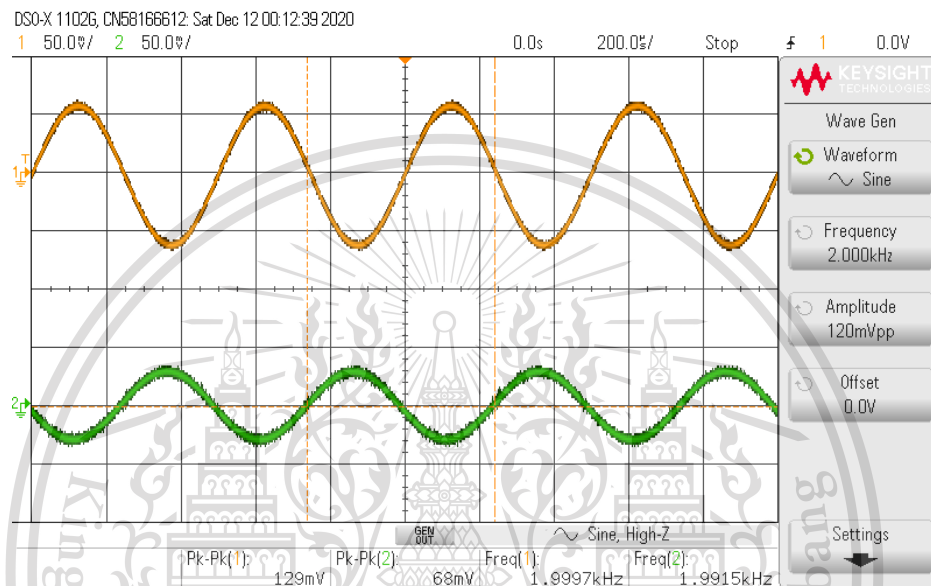
รูปที่ 3.38 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 1 kHz ของ FIR Lowpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 2 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.39 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 2 kHz เป็น passband edge frequency



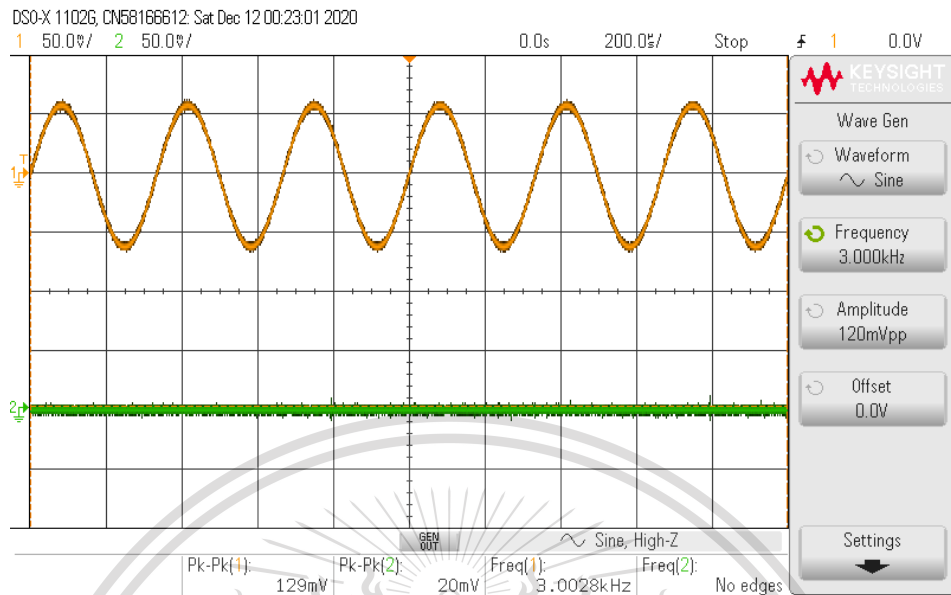
รูปที่ 3.39 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 2 kHz ของ FIR Lowpass filter

1.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.40 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.40 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 3 kHz ของ FIR Lowpass filter

### 2) FIR Highpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ FIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ในบล็อก Discrete FIR Filter เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Highpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.4 ในหัวข้อที่ 3.1.1.2 จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

เมื่อทำการทดลอง build FIR highpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.41 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับ

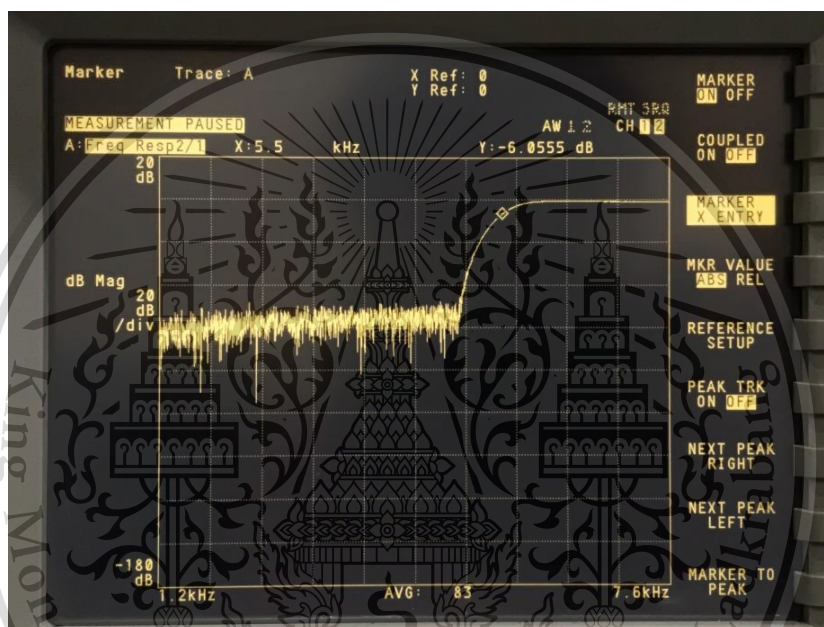
เอกสารนี้เป็นของ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.42 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.0555 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 3.42 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

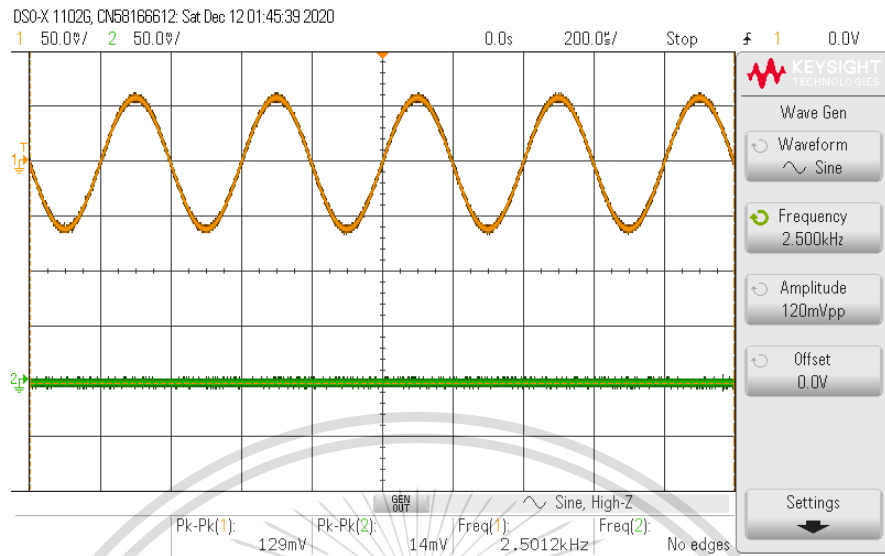
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.43 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

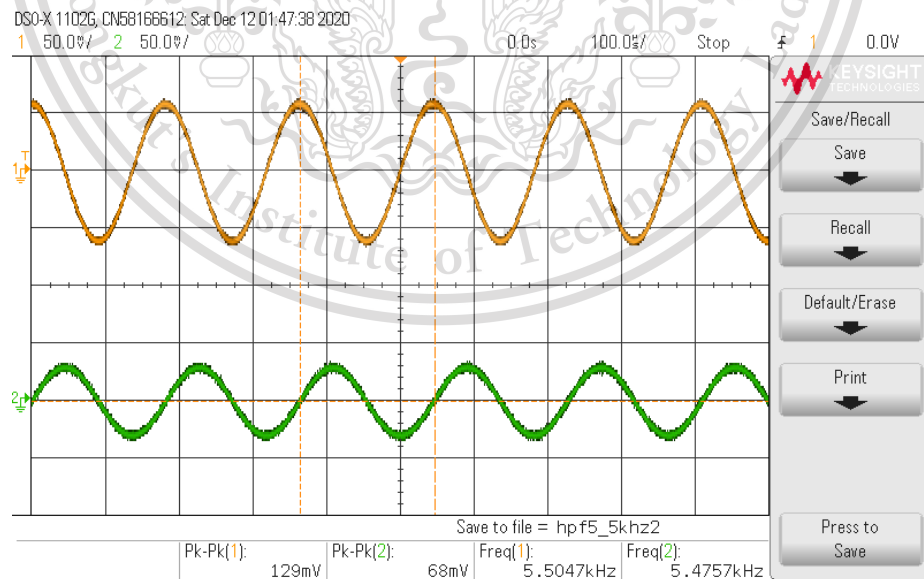
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.43 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Highpass filter

2.2) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 5.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.44 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5.5 kHz เป็น passband edge frequency



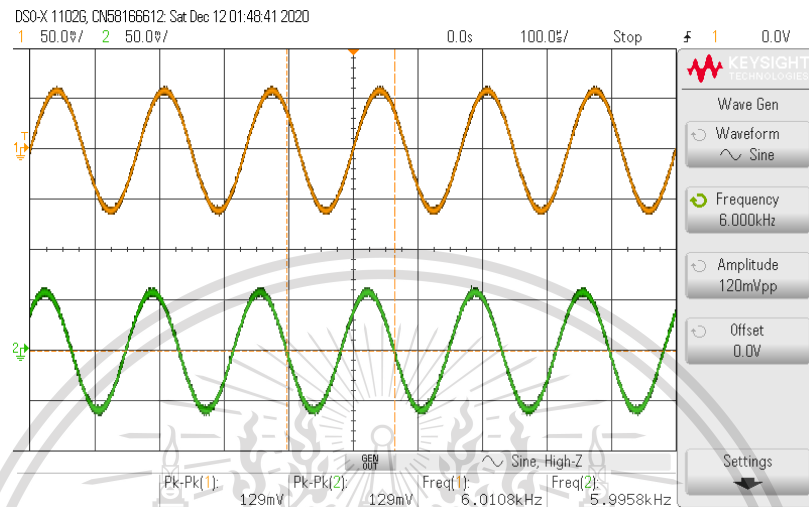
รูปที่ 3.44 สัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 5.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของ FIR Highpass filter ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

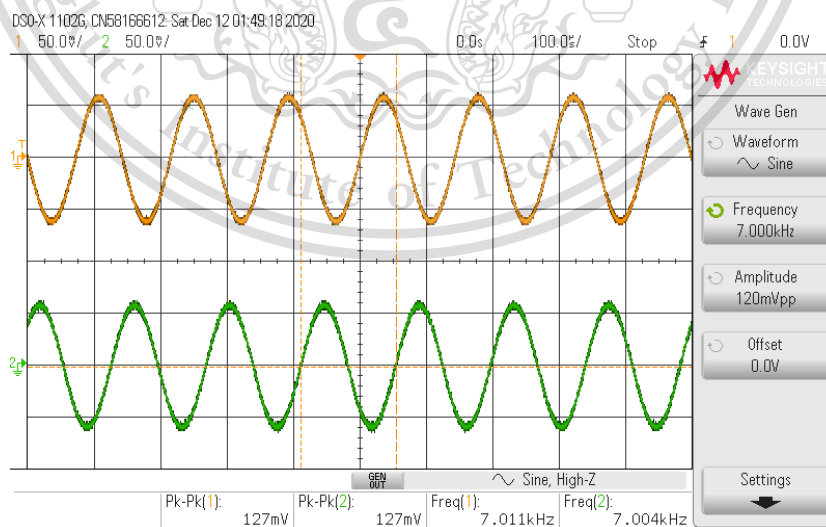
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.45 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณ  
อินพุต



รูปที่ 3.45 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 6 kHz  
ของ FIR Highpass filter

2.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.46 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณ  
อินพุต



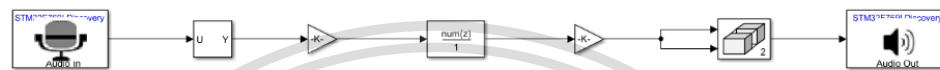
รูปที่ 3.46 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 7 kHz  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ของ FIR Highpass filter  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3) FIR Bandpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ FIR Lowpass filter ในหัวข้อ (1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ในบล็อก Discrete FIR Filter เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Bandpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.7 ในหัวข้อที่ 3.1.3 จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Bandpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Bandpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

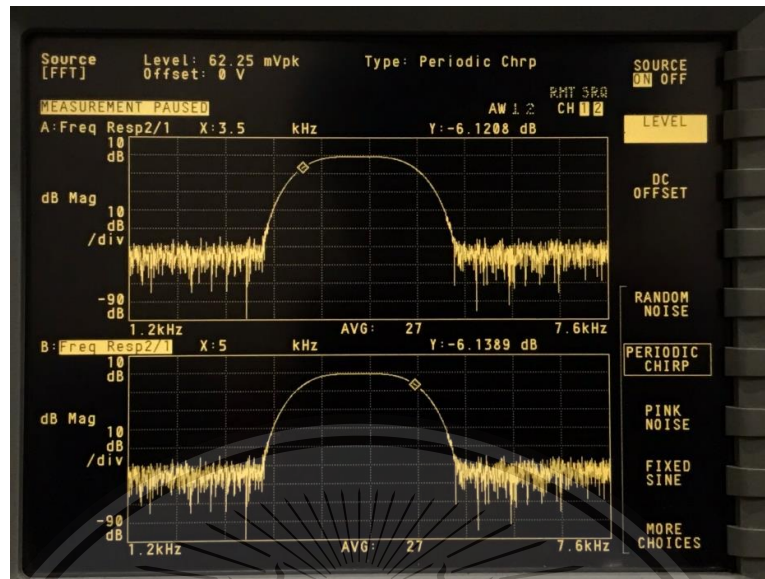
เมื่อทำการทดลอง build FIR bandpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.47 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.48 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1208 dB และ -6.1389 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

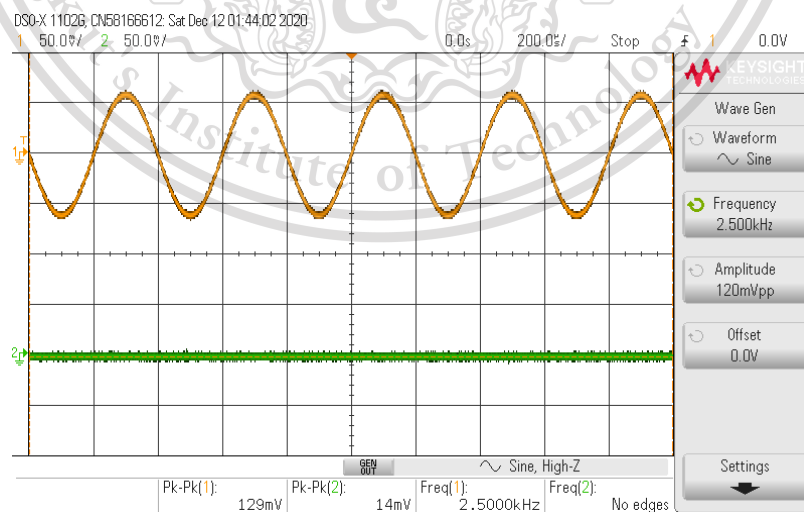
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.48 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

3.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.49 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



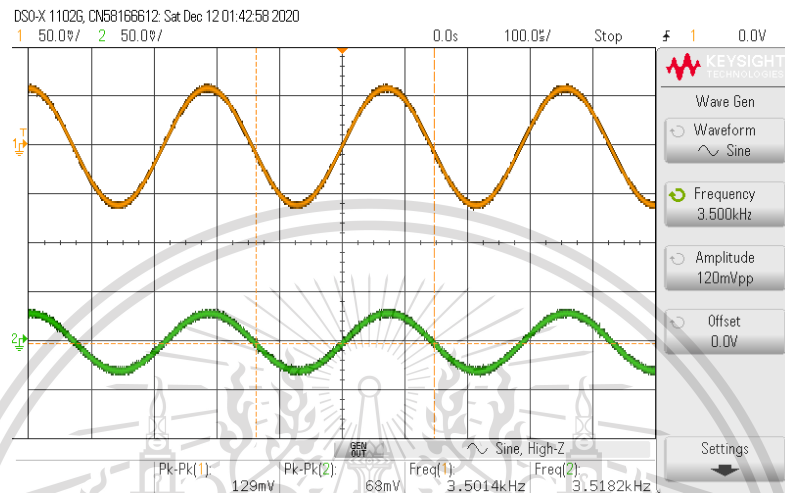
รูปที่ 3.49 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 2.5 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของ FIR Bandpass filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

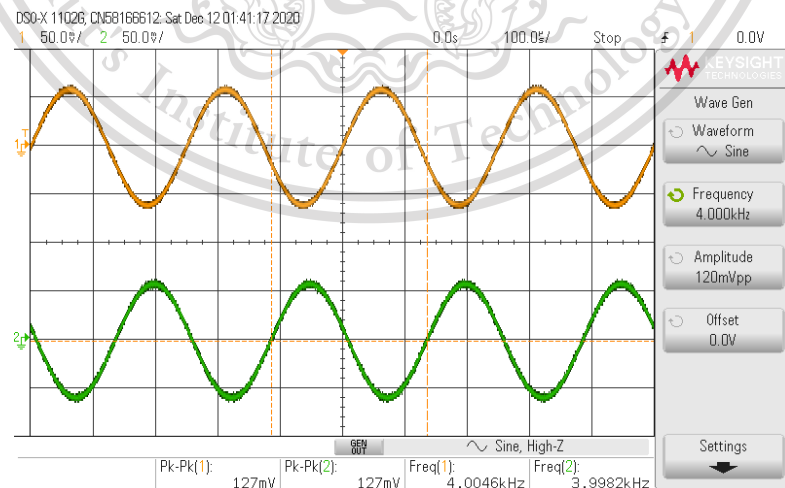
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.50 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 3.5 kHz เป็น passband edge frequency



รูปที่ 3.50 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 3.5 kHz ของ FIR Bandpass filter

3.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 4 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.51 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.51 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 4 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

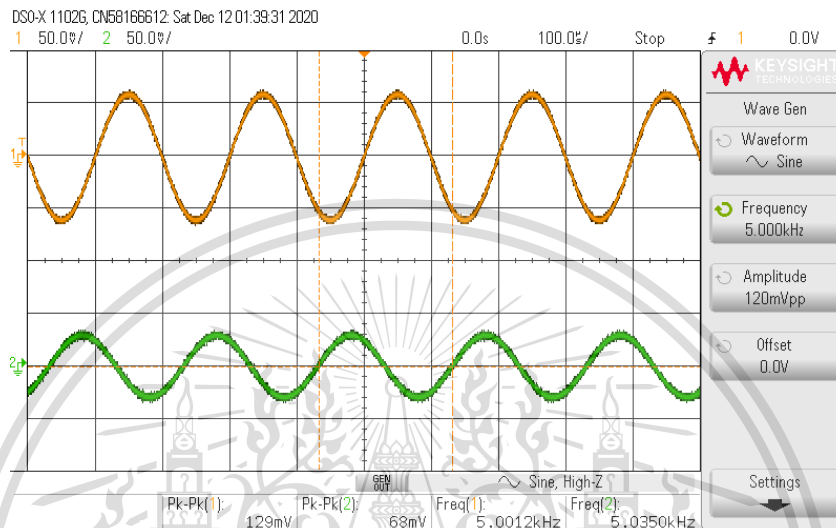
ของ FIR Bandpass filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

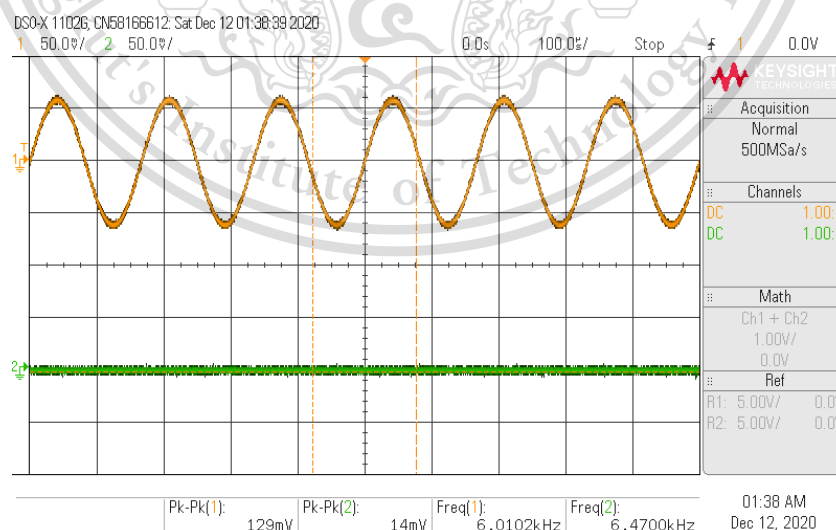
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.52 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5 kHz เป็น passband edge frequency



รูปที่ 3.52 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 5 kHz ของ FIR Bandpass filter

3.5) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.53 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.53 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandpass filter

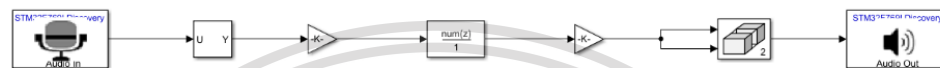
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ได้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4) FIR Bandstop filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ FIR Lowpass filter ในหัวข้อ (1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ในบล็อก Discrete FIR Filter เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Bandstop filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.10 ในหัวข้อที่ 3.1.1.4 จะได้ว่าวงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.54 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

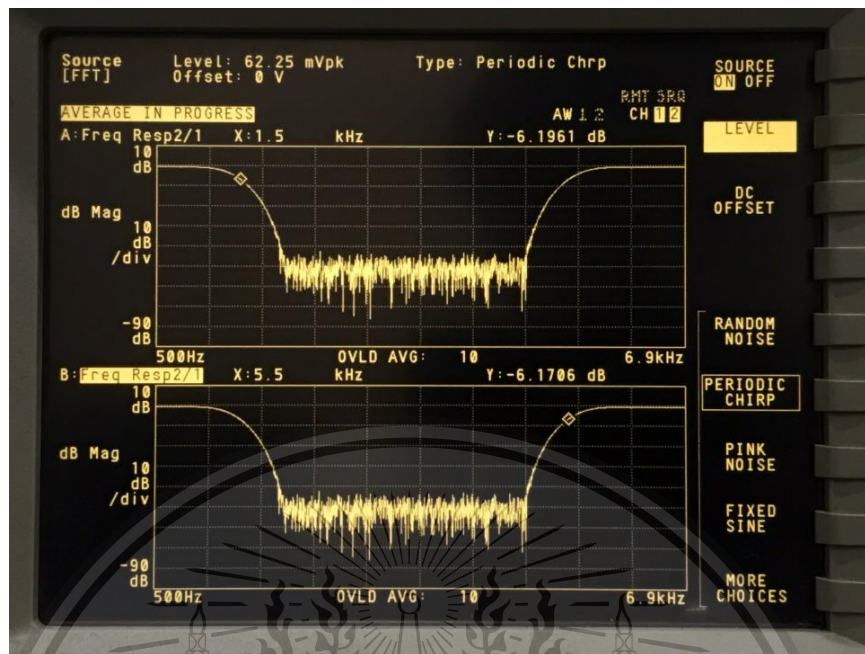
เมื่อทำการทดลอง build FIR bandstop filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.54 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.55 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1961 dB และ -6.1706 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.55 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

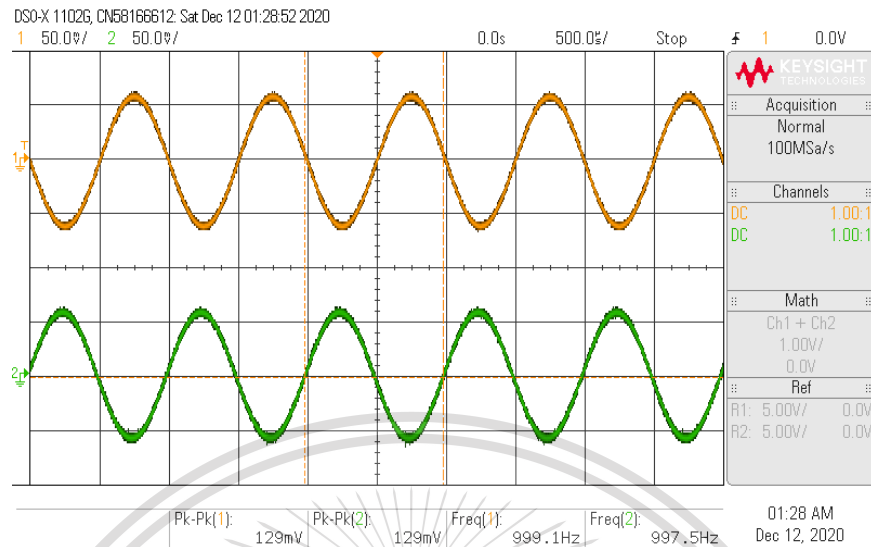
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

4.1) ป้อนสัญญาณชายน้ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.56 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

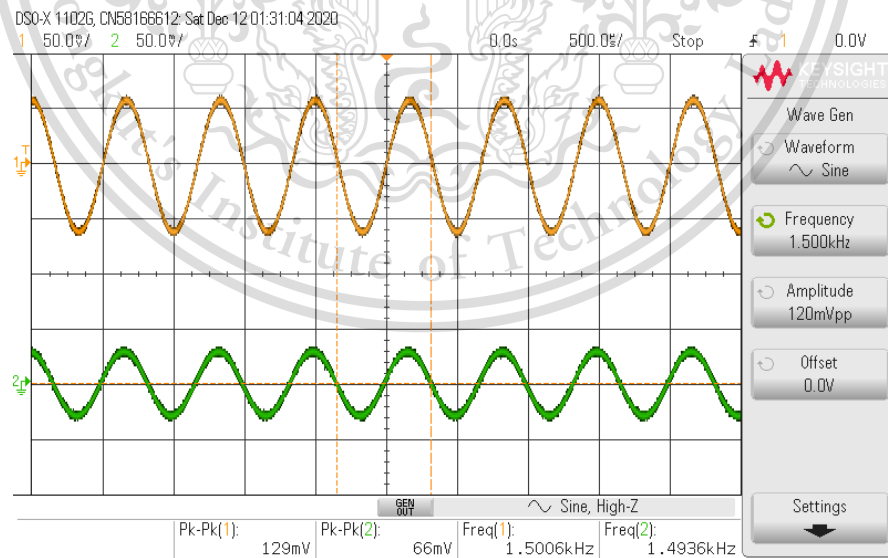
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.56 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 1 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.2) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 1.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.57 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 1.5 kHz เป็น passband edge frequency



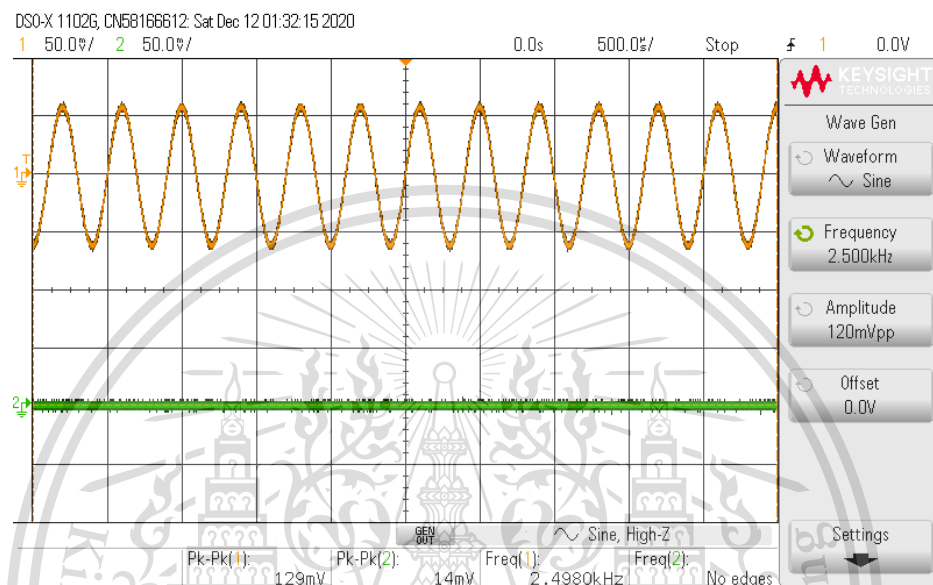
รูปที่ 3.57 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 1.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.58 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



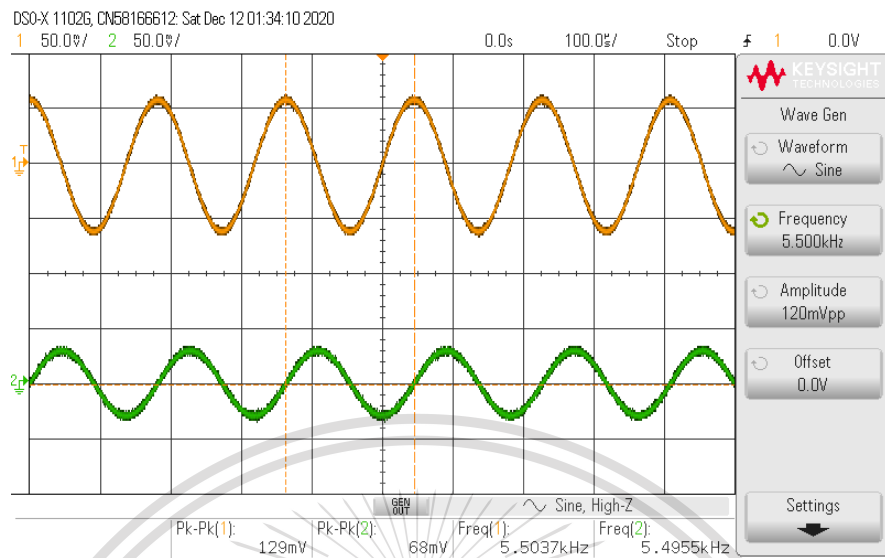
รูปที่ 3.58 วัตสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 5.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.59 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5.5 kHz เป็น passband edge frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

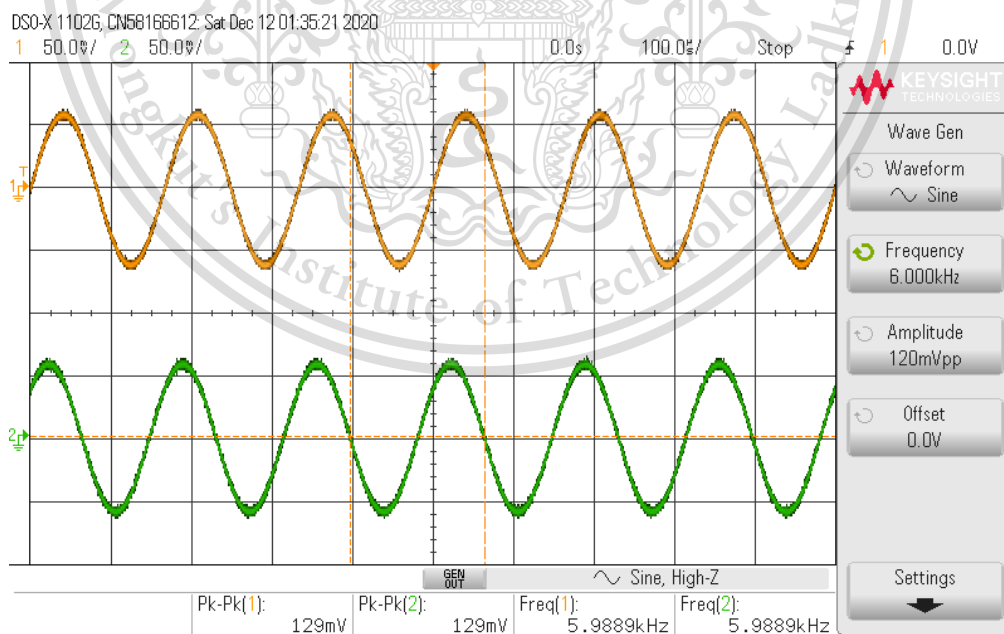
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.59 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 5.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.5) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.60 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.60 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 6 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของ FIR Bandstop filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

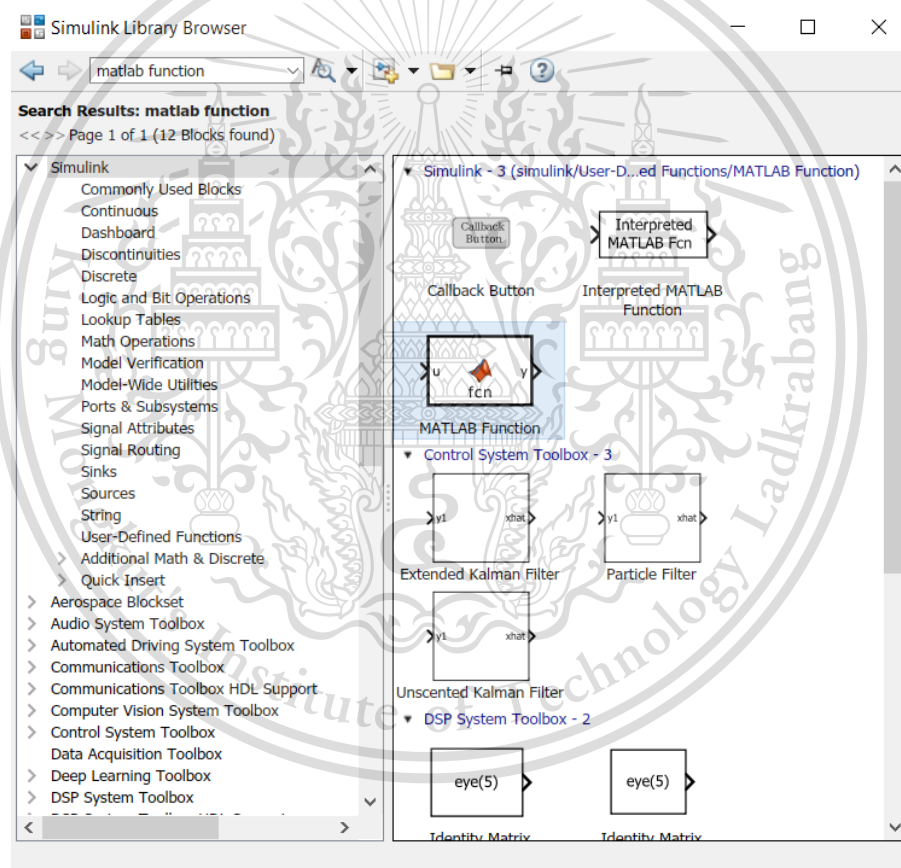
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1.2 การออกแบบ FIR filter ด้วย M-file

เป็นการออกแบบ FIR filter ทั้ง 4 ชนิดด้วยการต่อบล็อกและเขียนโปรแกรมสร้าง M-file ในโปรแกรม Matlab เองดังนี้

#### 1) FIR Lowpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับการสร้าง FIR filter ด้วยวิธีต่อบล็อก Simulink ในหัวข้อที่ 3.1.2.1 เพียงแต่ทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Matlab Function แล้วทำการเลือก Matlab Function ดังรูปที่ 3.61 จากนั้นทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างแทนที่บล็อก Discrete FIR Filter ดังรูปที่ 3.62

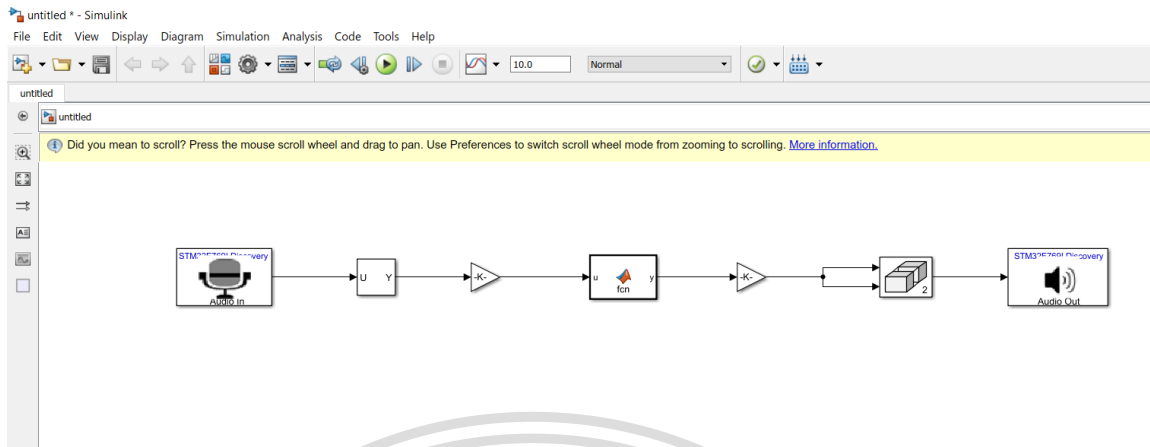


รูปที่ 3.61 บล็อก Matlab Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

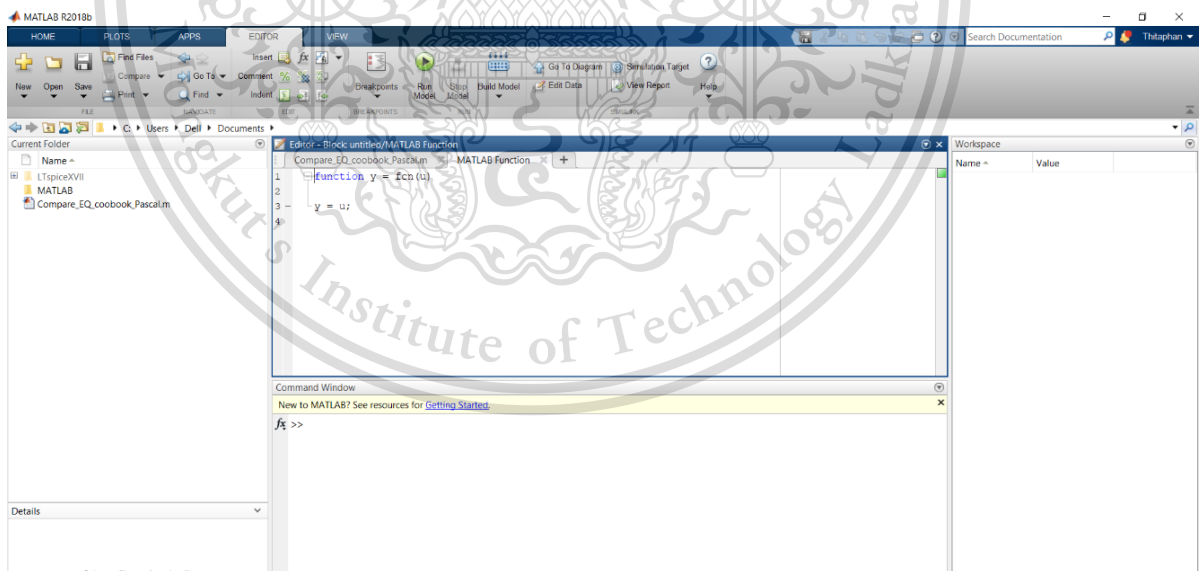
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.62 ลากบล็อก Matlab Function ออกมาวางในหน้าต่างแทนที่บล็อก Discrete FIR Filter

ทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก Matlab Function จะปรากฏพื้นที่หน้าต่างสำหรับเขียนโปรแกรม M-file ดังรูปที่ 3.63 จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้าง FIR Lowpass filter ดังรูปที่ 3.64 และ 3.65 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Lowpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab จากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.1.1



รูปที่ 3.63 หน้าต่างสำหรับเขียนโปรแกรม M-file

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

Editor - Block: IIR_MFile/MATLAB Function*
+1 Kaiser_LPF.m x LPF_2nd.m x MATLAB Function* x MATLAB Function* x MATLAB Function* x +
1 function [y, xm_out, ym_out] = iir_test(xn, xm_in, ym_in)
2     b = [0.0402    0.0805    0.0402];
3     a = [1.0000   -1.4850    0.6459];
4     y=ones(1024,1,'double');
5     xm = xm_in; %4*1
6     ym = ym_in; %4*1
7     for n=1:1024
8         y(n) = b(1)*xn(n);
9         for nn=1:length(b)-1
10            y(n) = y(n) + b(nn+1)*xm(nn) - a(nn+1)*ym(nn);
11        end
12        for i=length(b)-2:-1:1
13            xm(i+1) = xm(i);
14            ym(i+1) = ym(i);
15        end
16        xm(1) = xn(n);
17        ym(1) = y(n);
18    end
19    xm_out = xm;
20    ym_out = ym;
21 end

```

รูปที่ 3.64 โปรแกรมสร้าง FIR Lowpass filter (1)

```

Editor - Block: fir_test_hpfHan/MATLAB Function*
+1 Kaiser_LPF.m x LPF_2nd.m x MATLAB Function* x MATLAB Function* x MATLAB Function* x +
1 function [y, xm_out] = fir_test(xn, xm_in)
2     b = [0.0122426879301458,0.00900316316157106,-9.74542958129844e-18,-0.00978604691475];
3     sample_per_frame = 1024;
4     y = ones(sample_per_frame,1,'double');
5     xm = xm_in;
6
7     for n = 1:sample_per_frame
8         y(n) = xn(n)*b(1);
9         for nn = 1:length(b)-1
10            y(n) = b(nn+1)*xn(nn);
11        end
12        for i = length(b)-2:-1:1
13            xm(i+1) = xm(i);
14        end
15        xm(1) = xn(n);
16    end
17
18    xm_out = xn;
19

```

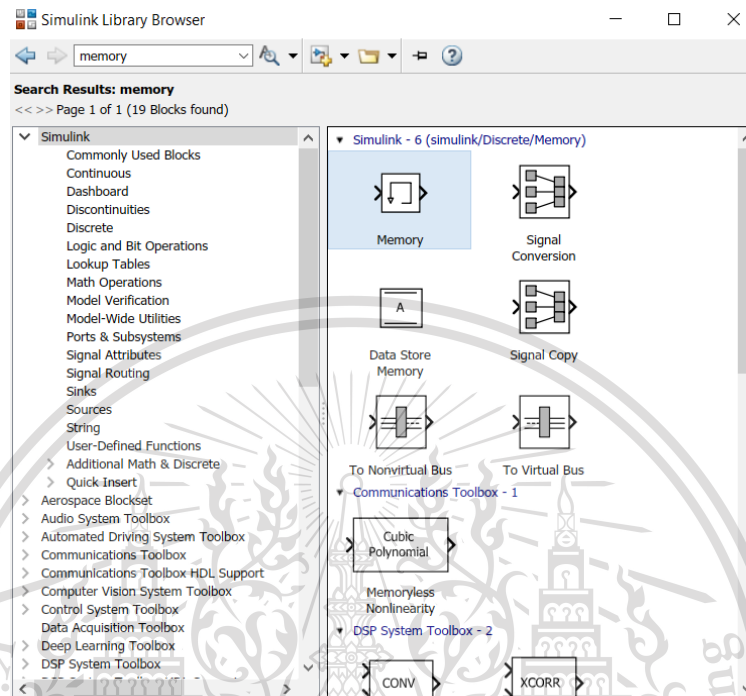
รูปที่ 3.65 โปรแกรมสร้าง FIR Lowpass filter (2)

จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า memory แล้วทำการเลือกบล็อก Memory ดังรูปที่ 3.66 จากนั้นให้เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นตามการค้าทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 3.67 แล้วทำการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

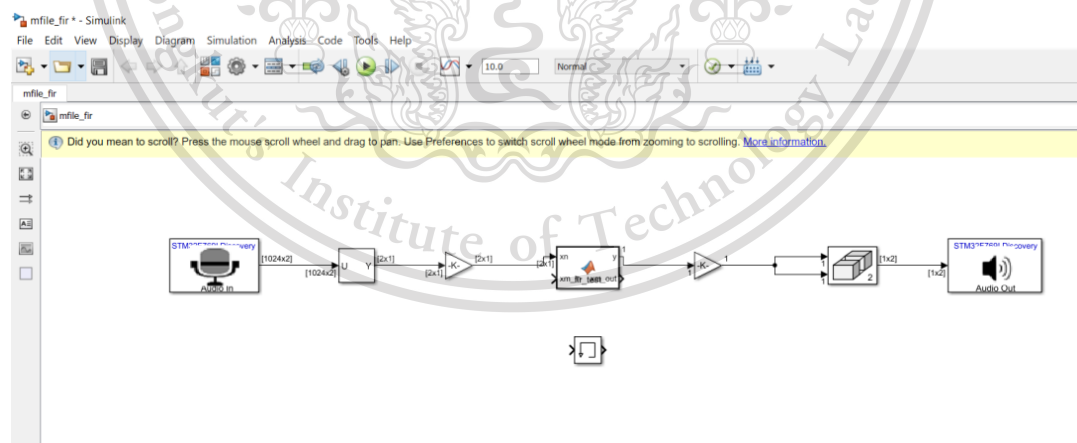
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

flip บล็อก Memory และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matlab Function และ Memory ดังรูปที่ 3.68



รูปที่ 3.66 บล็อก Memory

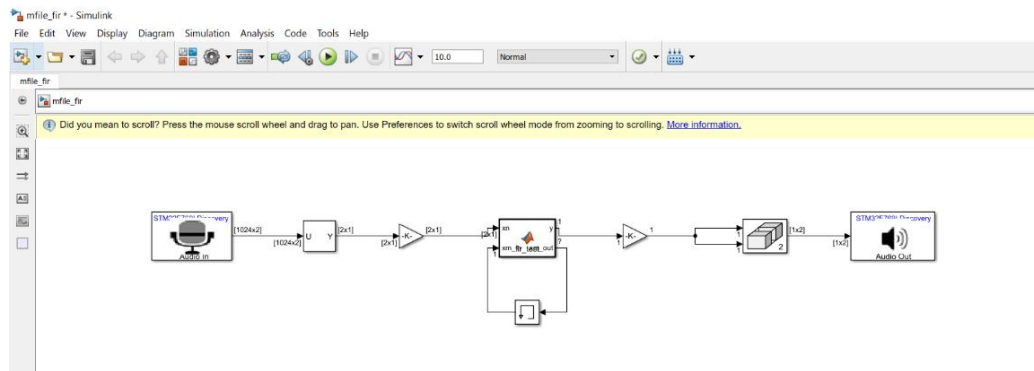


รูปที่ 3.67 ลากบล็อก Memory ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

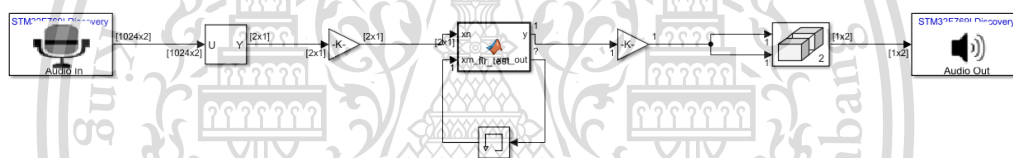
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.68 ทำการ flip บล็อก Memory และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matlab Function และ Memory

จะได้ออกแบบ Simulink แบบ M-file ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.69



รูปที่ 3.69 วงจร Simulink แบบ M-file ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

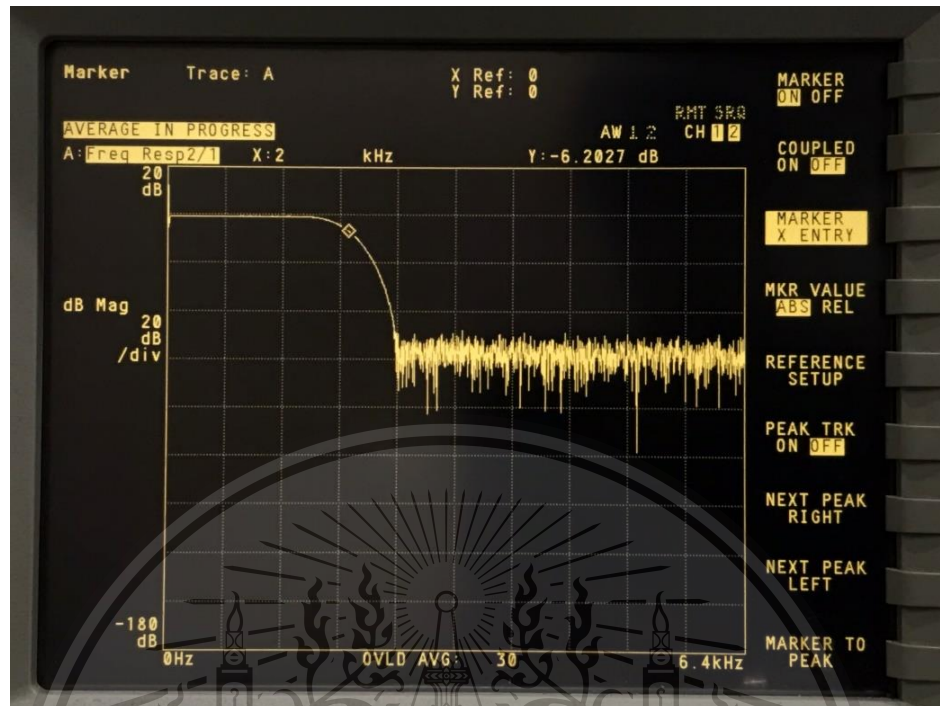
เมื่อทำการทดลอง build FIR lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.35 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.70 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 2 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.2027 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.70 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

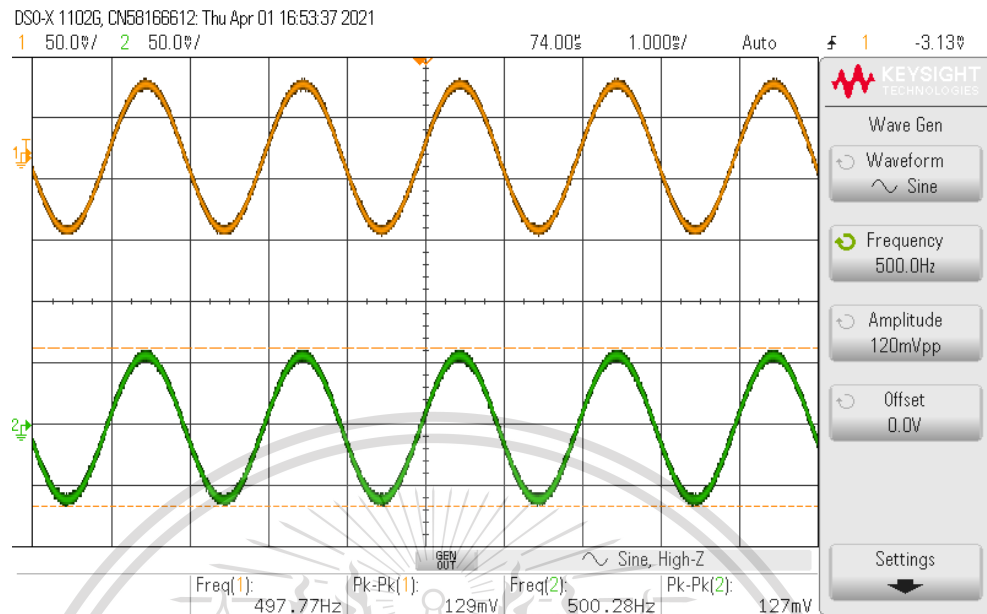
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1.1) ป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ 500 Hz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.71 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

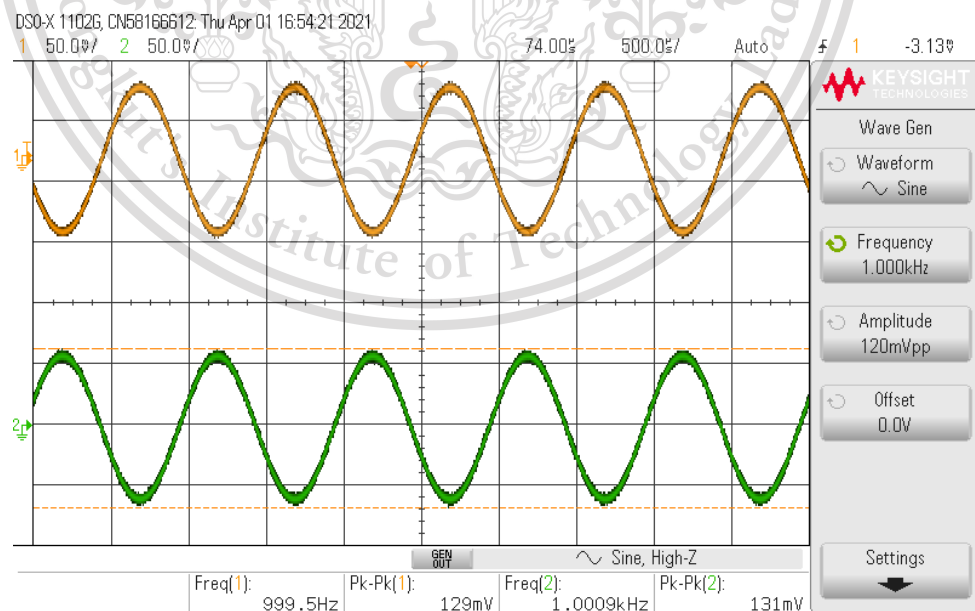
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.71 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 500 Hz ของ FIR Lowpass filter

1.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.72 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



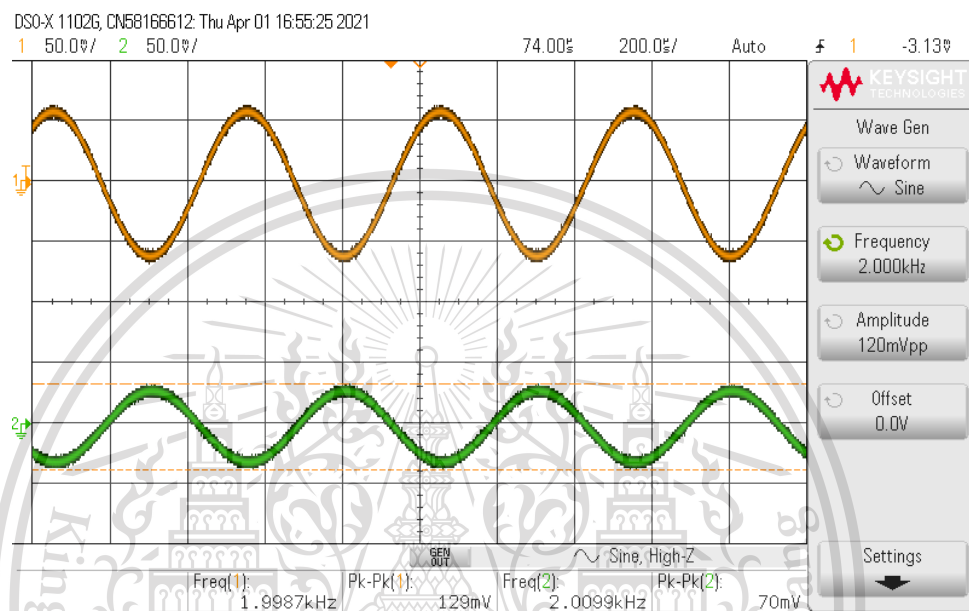
รูปที่ 3.72 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 1 kHz ของ FIR Lowpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 2 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.73 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 2 kHz เป็น passband edge frequency



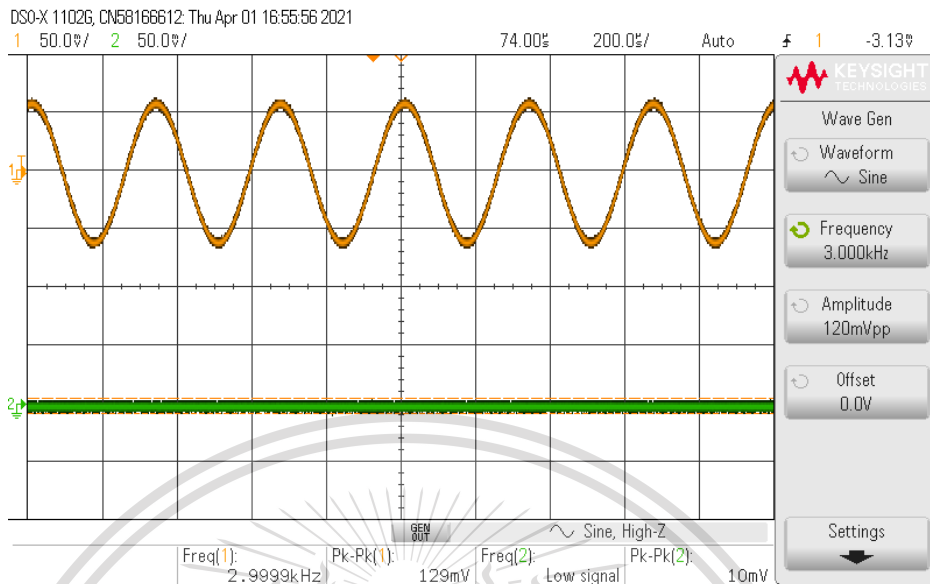
รูปที่ 3.73 วัตสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 2 kHz ของ FIR Lowpass filter

1.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.74 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

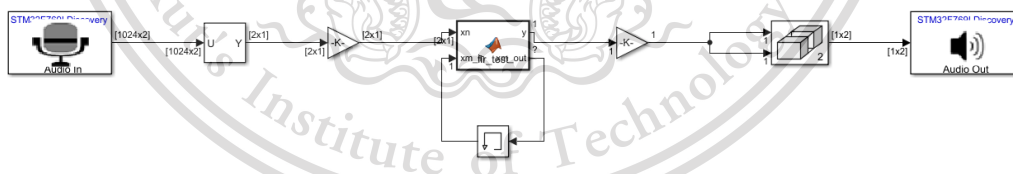
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.74 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 3 kHz ของ FIR Lowpass filter

2) FIR Highpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ FIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในบล็อก Matlab Function เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Highpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.4 ในหัวข้อที่ 3.1.2.1 วงจร Simulink แบบ M-file ของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.75



รูปที่ 3.75 วงจร Simulink แบบ M-file ของ FIR Highpass filter

เมื่อทำการทดลอง build FIR highpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.76 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

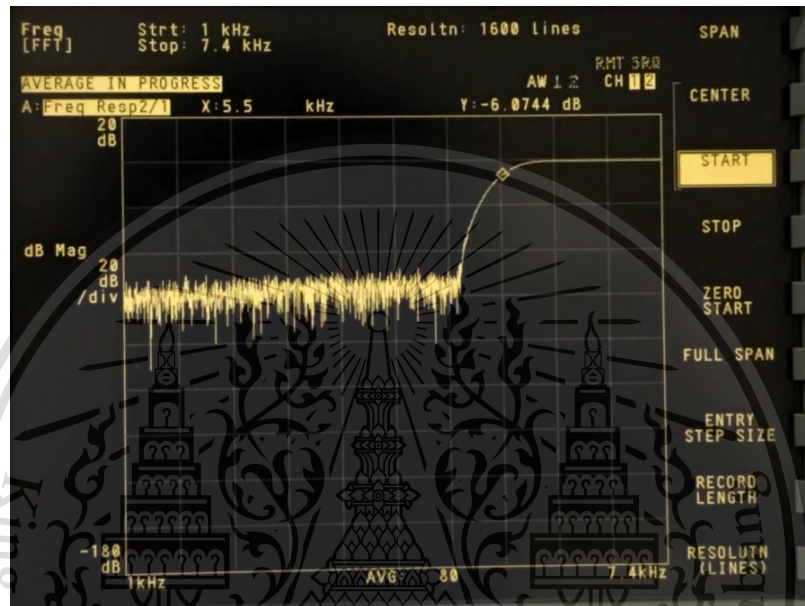
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.76 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.0555 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 3.76 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

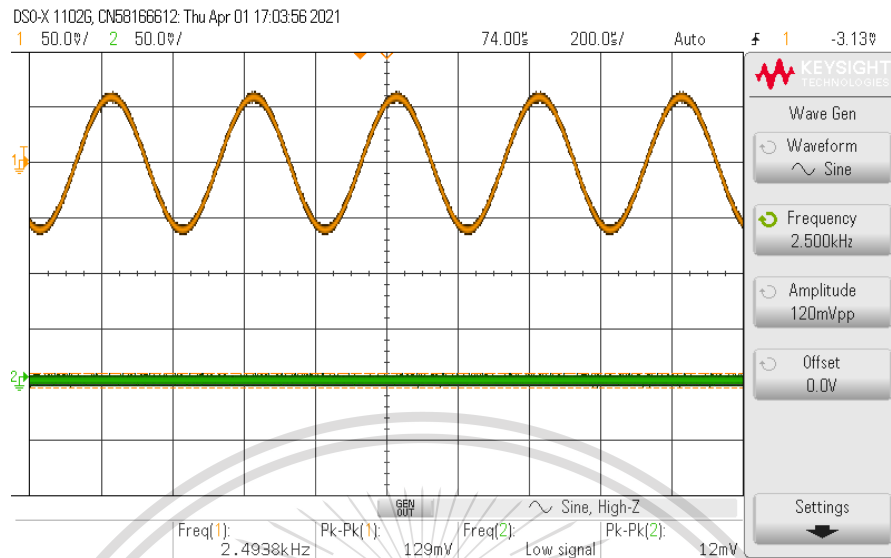
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.77 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

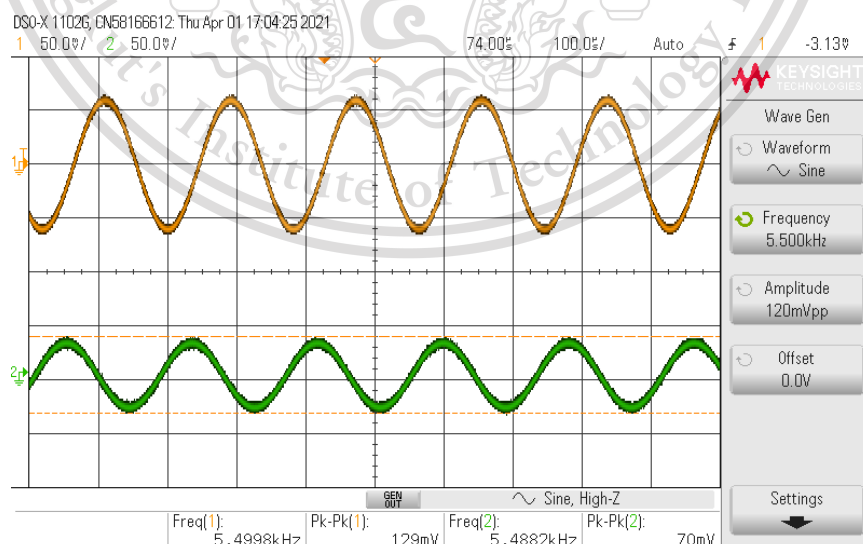
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.77 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 2.5 kHz ของ FIR Highpass filter

2.2) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 5.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.78 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5.5 kHz เป็น passband edge frequency



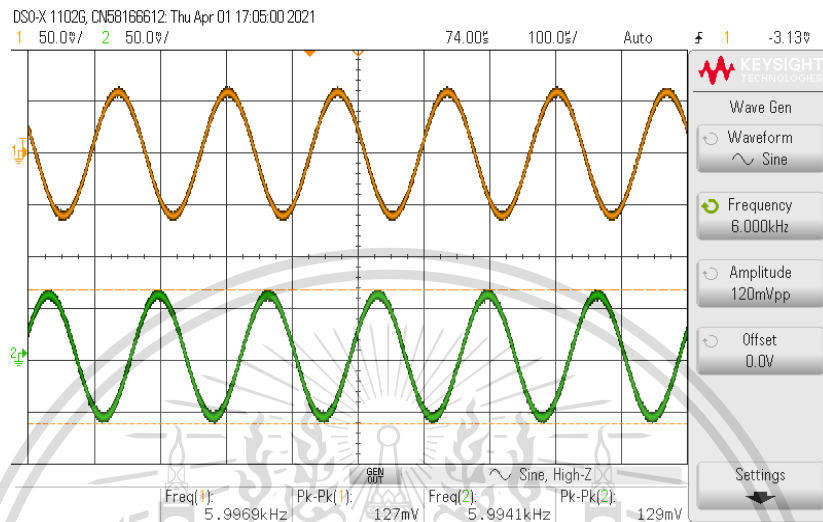
รูปที่ 3.78 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 5.5 kHz ของ FIR Highpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

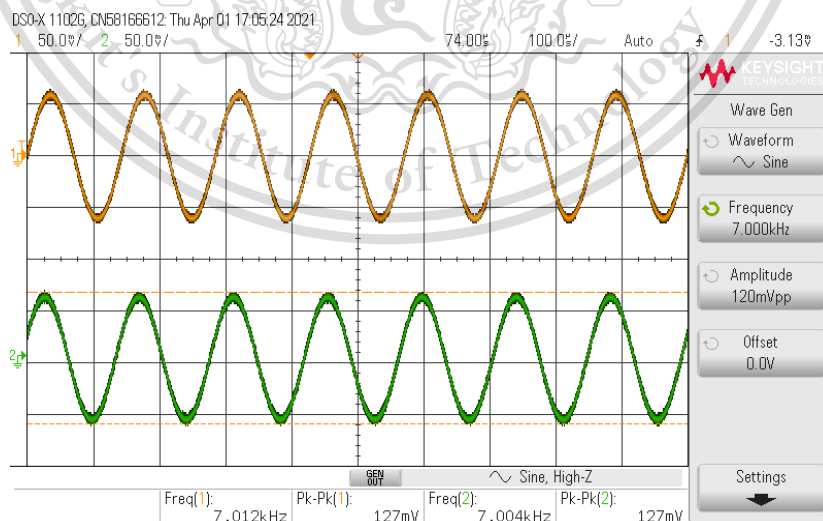
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.79 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณ  
อินพุต



รูปที่ 3.79 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 6 kHz  
ของ FIR Highpass filter

2.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.01 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณ  
อินพุต



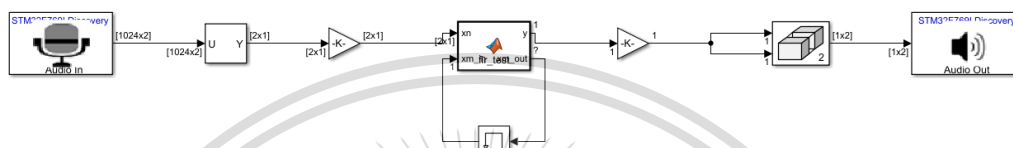
รูปที่ 3.80 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 7 kHz  
ของ FIR Highpass filter

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3) FIR Bandpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ FIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในบล็อก Matlab Function เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Bandpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.7 ในหัวข้อที่ 3.1.3.1 จะได้วงจร Simulink แบบ M-file ของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.81



รูปที่ 3.81 วงจร Simulink แบบ M-file สำเร็จของ FIR Bandpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

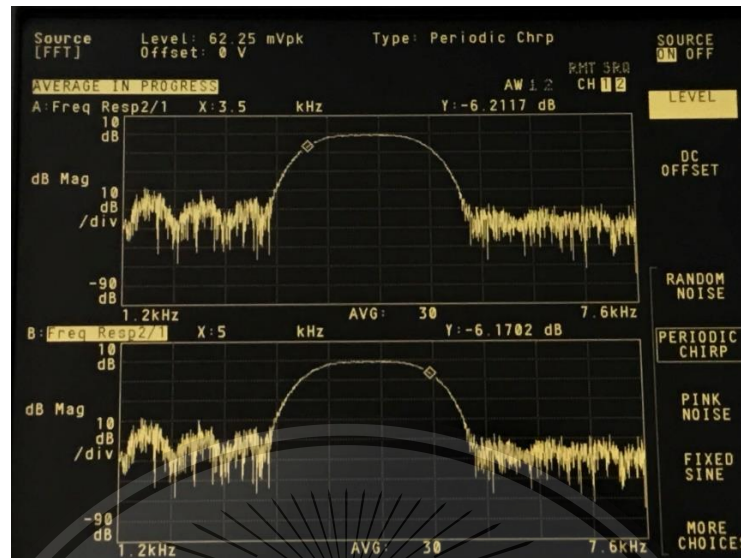
เมื่อทำการทดลอง build FIR bandpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.82 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.82 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1208 dB และ -6.1389 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

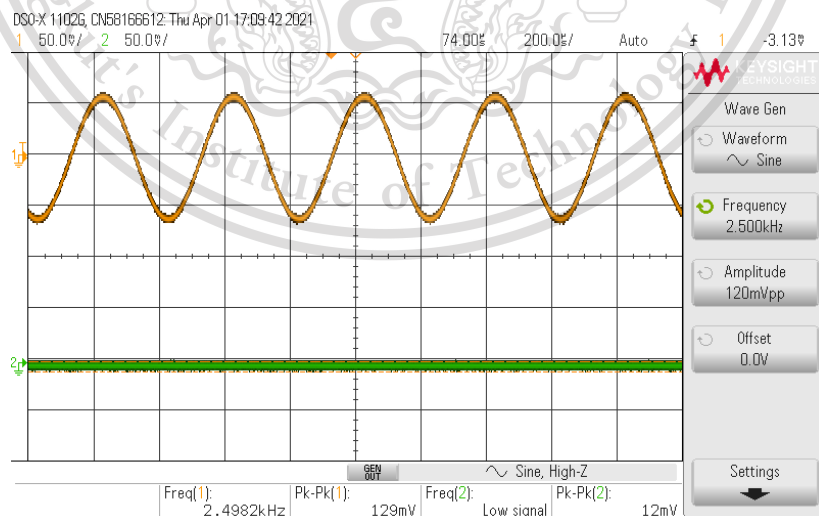
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.82 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชานความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

3.1) ป้อนสัญญาณชานความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.83 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



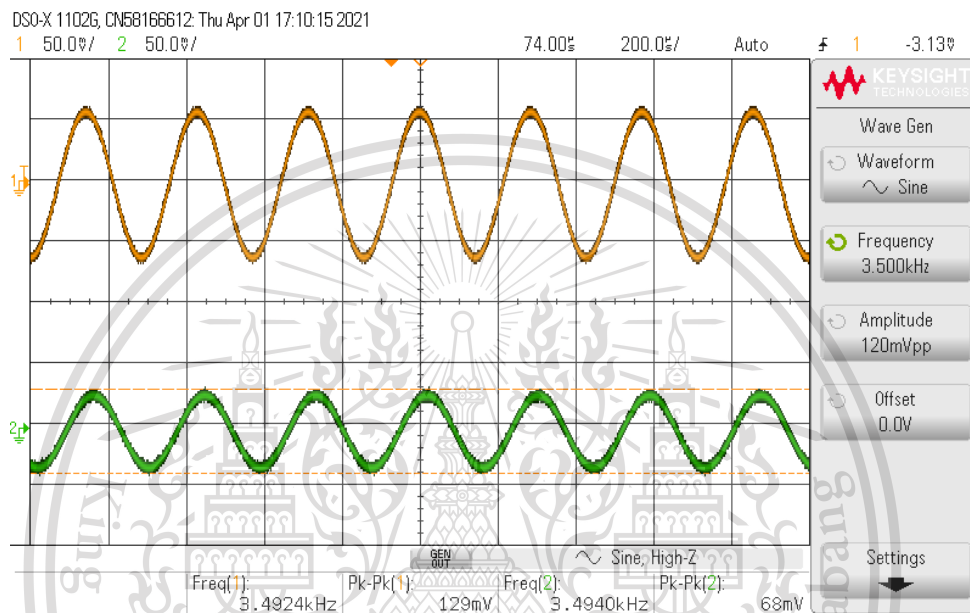
รูปที่ 3.83 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณชานที่ความถี่ 2.5 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของ FIR Bandpass filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.84 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 3.5 kHz เป็น passband edge frequency



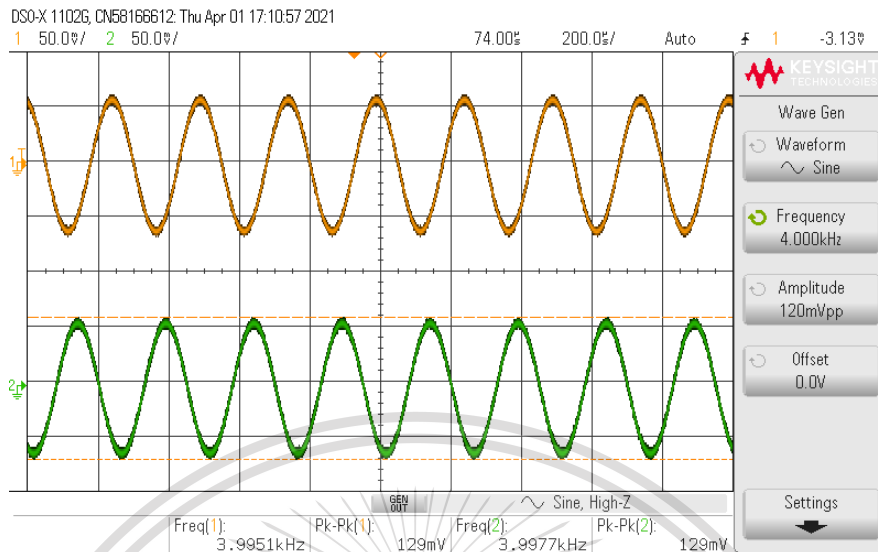
รูปที่ 3.84 วัตสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 3.5 kHz ของ FIR Bandpass filter

3.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 4 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.85 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

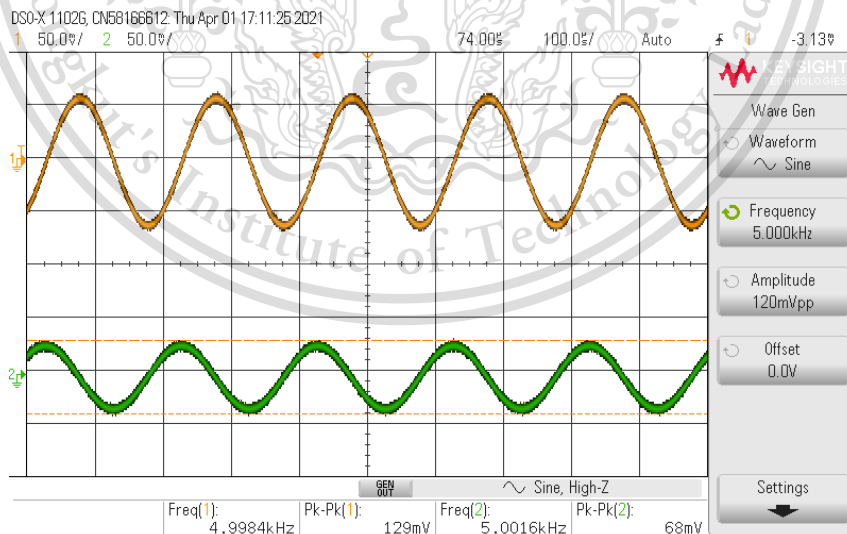
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.85 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 4 kHz ของ FIR Bandpass filter

3.4) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.86 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5 kHz เป็น passband edge frequency



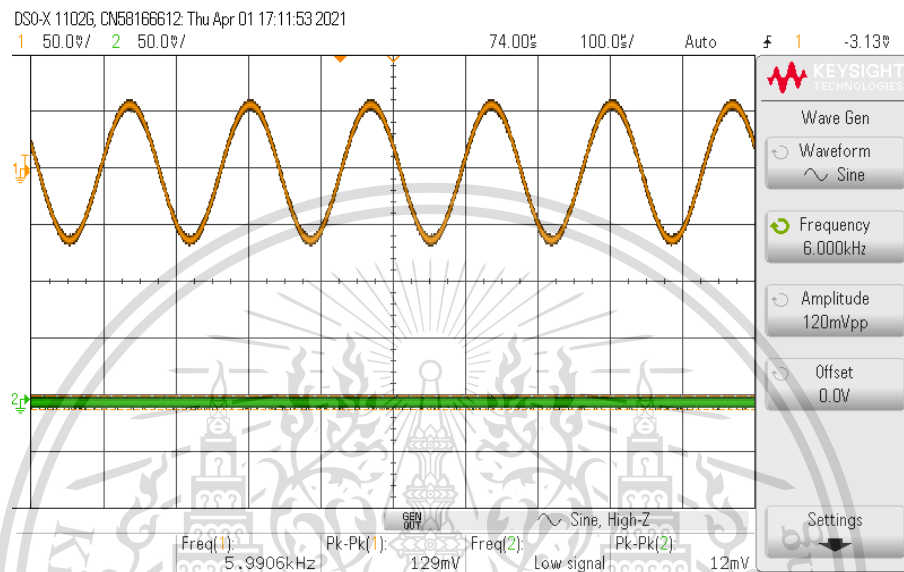
รูปที่ 3.86 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 5 kHz ของ FIR Bandpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

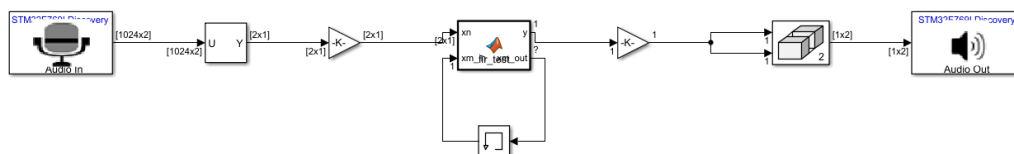
3.5) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.87 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 3.87 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandpass filter

#### 4) FIR Bandstop filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ FIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในบล็อก Matlab Function เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Bandstop filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.10 ในหัวข้อที่ 3.1.4 จะได้วงจร Simulink แบบ M-file ของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 3.88



รูปที่ 3.88 วงจร Simulink แบบ M-file ของ FIR Bandstop filter

ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

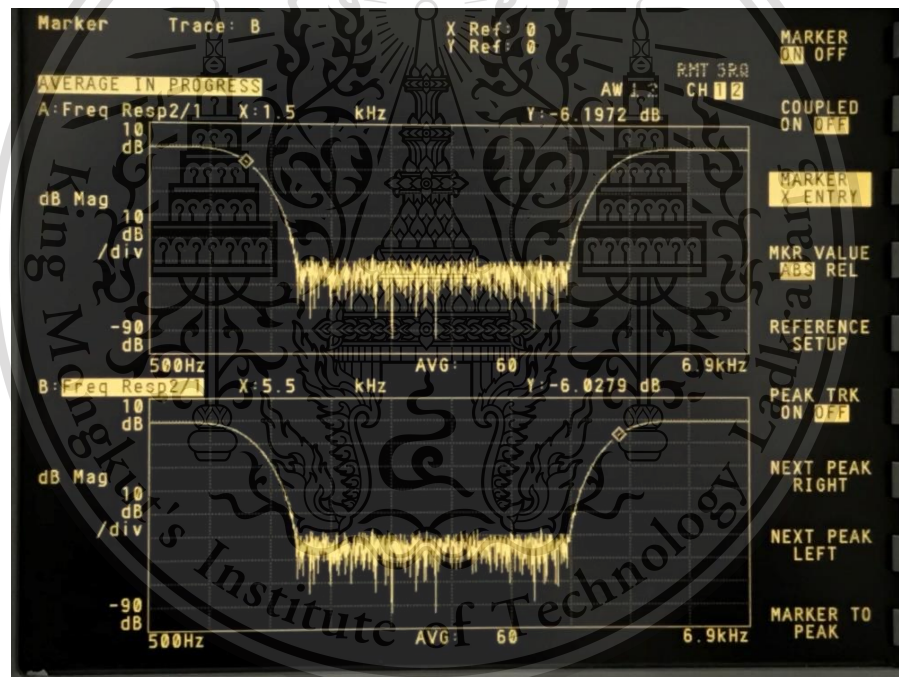
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยในเพียงการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการทดลอง build FIR bandstop filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.89 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.89 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าแอมพลิจูดประมาณ -6.1961 dB และ -6.1706 dB ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 3.89 ผลการวัด Amplitude Response ของ FIR Bandstop filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function จากเครื่อง Dynamic Signal Analyzer

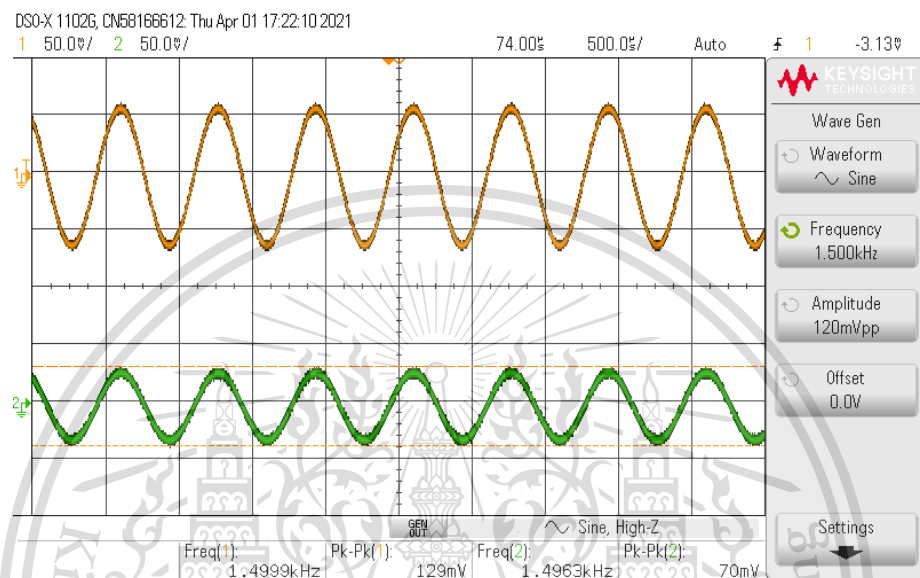
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชานความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.90 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



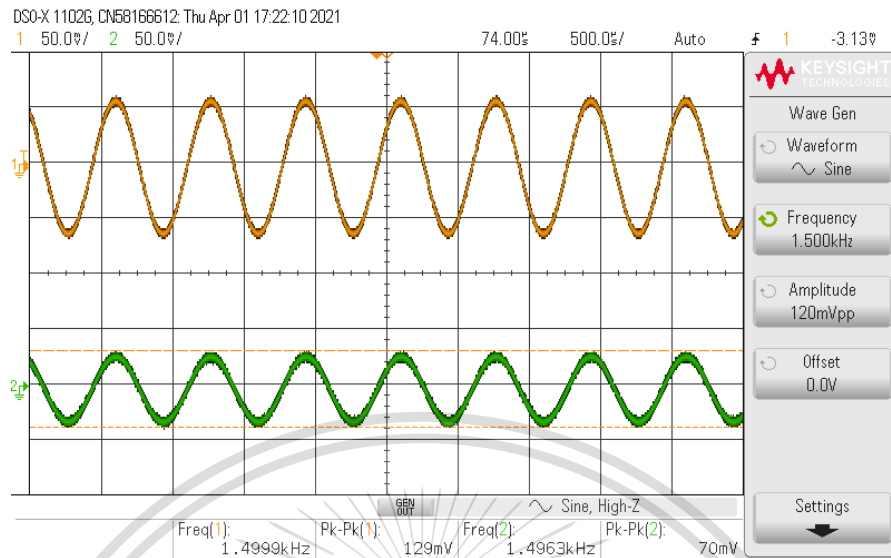
รูปที่ 3.90 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 1 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.91 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 1.5 kHz เป็น passband edge frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

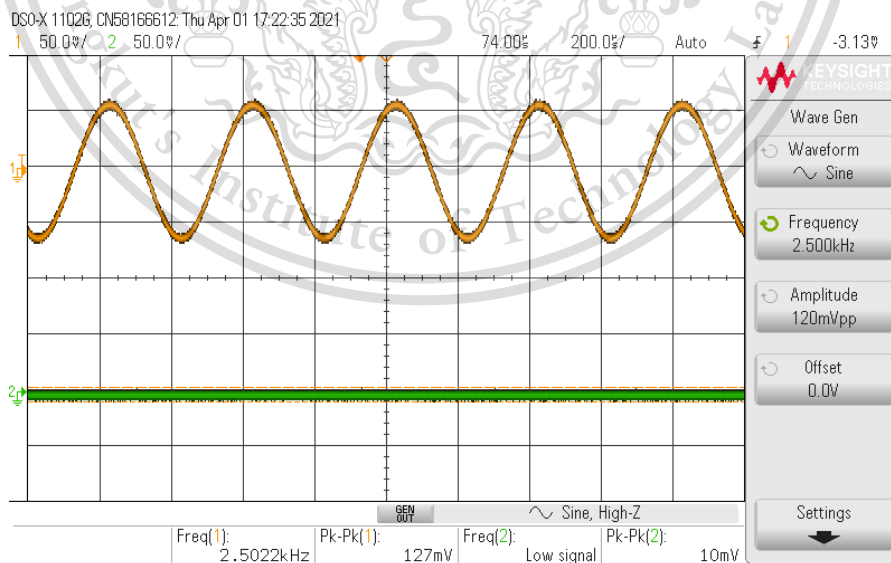
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.91 วัตสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 1.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.3) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.92 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



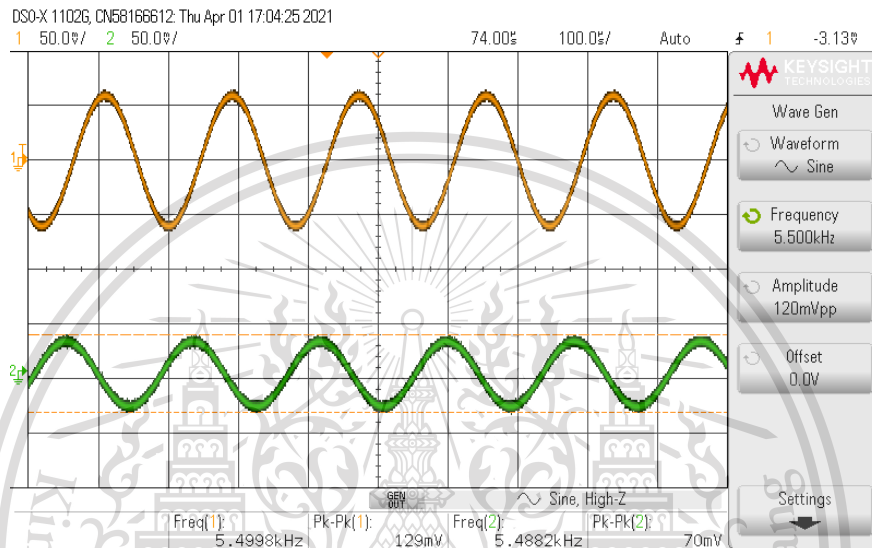
รูปที่ 3.92 วัตสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 2.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 5.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.93 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของสัญญาณอินพุต เนื่องจากที่ความถี่ 5.5 kHz เป็น passband edge frequency



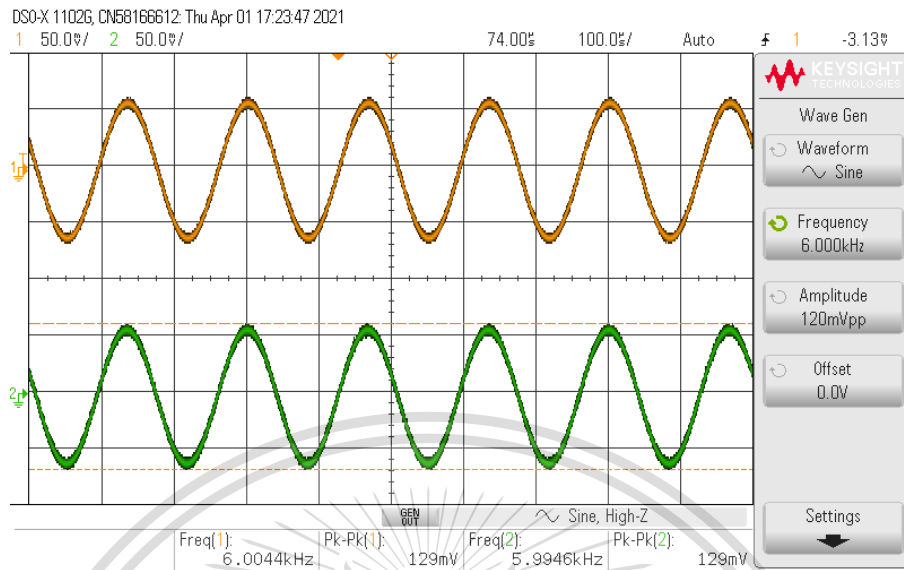
รูปที่ 3.93 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 5.5 kHz ของ FIR Bandstop filter

4.5) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 6 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.94 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.94 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 6 kHz ของ FIR Bandstop filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### IIR Implement

#### Poles-zeros placement

การเขียนแสดงการทำงานของ IIR digital filter ด้วย difference equation นั้นสามารถเขียนออกมาในรูปแบบของ recursive equation ดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) - \sum_{k=0}^M b_k y(n-k) \quad (4.1)$$

โดยจากสมการที่ (1)  $h(k)$  คือ impulse response ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องมีถึง infinite ตัว ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ ทำให้การทำงานของ IIR filter และมีรูปแบบการคำนวณที่เป็นสมการแบบ recursive คือมีการป้อนกลับ

อีกลักษณะหนึ่งที่ใช้เขียนแทน IIR filter คือการแทนให้อยู่ในรูปของ Transfer function  $H(z)$  ดังนี้

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}}{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}} = \frac{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=0}^M b_k z^{-k}} \quad (4.2)$$

$r = 1 - \left(\frac{BW}{F_s}\right)\pi$  Transfer function ในสมการที่ (2) แสดงอยู่ในรูปของเทอมที่

Numerator polynomial ซึ่งรากสมการ Numerator polynomial เป็นศูนย์และทำให้  $H(z)$  มีค่าเป็นศูนย์ด้วยเรียกว่า zeros และรากที่ทำให้ denominator polynomial มีค่าเป็น infinite เรียกว่า poles ดังนั้น สามารถเขียนเป็น transfer function  $H(z)$  ในอีกลักษณะที่เรียกว่า pole-zero gain ดังนี้

$$H(z) = \frac{K(z-z_1)(z-z_2)\dots(z-z_N)}{(z-p_1)(z-p_2)\dots(z-p_M)} \quad (4.3)$$

โดย  $z$  เรียกว่า zeros ของ  $H(z)$ ,  $p$  เรียกว่า poles ของ  $H(z)$  และค่า  $K$  เป็นค่าคงที่ เกิดขึ้นมาจากการแยกตัวประกอบ

การ plot ตำแหน่งของ poles และ zeros ของ transfer function ลงบนระนาบ  $z$ -plane ที่มี unit circle อยู่บนนั้นด้วย เรียกว่า pole-zero diagram (สำหรับระบบที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

discrete-time system) โดยระบบที่มีความเสถียรภาพ pole จะต้องอยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วย นั่นคือขนาดของ pole ต้องมีค่าไม่เกิน 1

ขั้นตอนการออกแบบ IIR filter

1) Filter specifications คือ การกำหนดข้อกำหนดของการออกแบบว่าต้องการ filter ในคุณลักษณะไหน

2) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ num และ den ของ transfer function  $H(z)$  ที่จะให้คู้ขลักษณะของ filter นั้นเป็นไปตามที่กำหนดไว้

3) การแปลงจาก transfer function ให้เป็น filter structure ที่เหมาะสม โดยทั่วไป โครงสร้างของ IIR filter จะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ Direct form I และ Direct form II ซึ่งนิยมใช้ Direct form II กระบระบบที่เป็น  $2^{\text{nd}}$  order และโครงสร้าง cascade และ parallel ซึ่งประกอบด้วยระบบที่เป็น  $2^{\text{nd}}$  order ย่อยๆ หรือ  $1^{\text{st}}$  order

4) ผลลัพธ์ที่เกิดจากการคำนวณภายใน filter ถูกแทนด้วยจำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ของบิตที่มีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่เป็น Hardware Implement

วิธี Poles-zeros placement สามารถนำไปใช้ในการออกแบบฟิลเตอร์แบบ IIR ได้ ทั้ง 4 ประเภท คือ Lowpass filter, Highpass filter, Bandpass filter และ Bandstop filter โดยในส่วนของการออกแบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้

#### 4.1.1 การออกแบบ FIR filter ด้วย Matlab

เป็นการออกแบบ FIR filter ด้วยวิธี Kaiser window function โดยจะนำเอาหลักการและทฤษฎีข้างต้นมาทำการเขียนโปรแกรมใน Matlab ดังนี้

##### 4.1.1.1 2nd IIR Lowpass filter

กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz และ passband edge frequency (0.707) อยู่ที่ 3.25 kHz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.4)

$$r = 1 - \left( \frac{f_c}{F_s} \right) \pi \quad (4.4)$$

จากทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

LPF_2nd.m x BSF_2nd.m x BPF_2nd.m x HPF_2nd.m x Kaiser_BSF.m x Kaiser_BPS.m x +
1 - clear all;
2 - clc;
3 - Fs=16000; %sampling rate(Hz)
4 - fc=3250; %cutoff frequency(Hz)
5 - f0=fc; %center frequency
6 - w=(2*pi*f0)/Fs
7 - r=1-((f0/Fs)*pi);
8 - K=(1-(2*r*cos(w))+r^2)/4
9 - num=[K 2*K K]
10 - den=[1 -2*r*cos(w) r^2]
11 - [H,q] = freqz(num, den, 1024, Fs);
12
13 - figure(1)
14 - zplane(num,den,'k')
15 - title('z-plane')
16
17 - figure(2)
18 - plot(q,abs(H),'m');grid
19 - title('Magnitude Spectrum')
20 - xlabel('frequency'); ylabel('Magnitude')
21
22 - figure(3)
23 - plot(q,angle(H)*180/pi,'k');grid
24 - title('Phase Response')
25 - xlabel('frequency (Hz)'); ylabel('Phase (degree)')

```

รูปที่ 4.1 โปรแกรม 2nd IIR Lowpass filter ใน Matlab

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์, กราฟ z-plane, Magnitude response และ Phase response ของ 2nd IIR Lowpass filter ดังรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

```

Command Window
num =
    0.2302    0.4604    0.2302
den =
    1.0000   -0.2101    0.1309

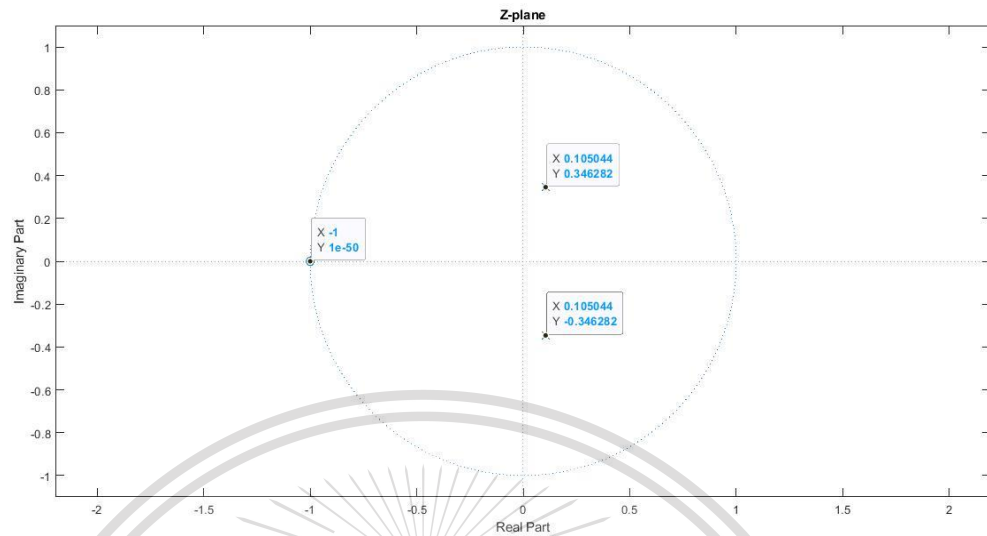
```

รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของ IIR Lowpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Poles-zeros placement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

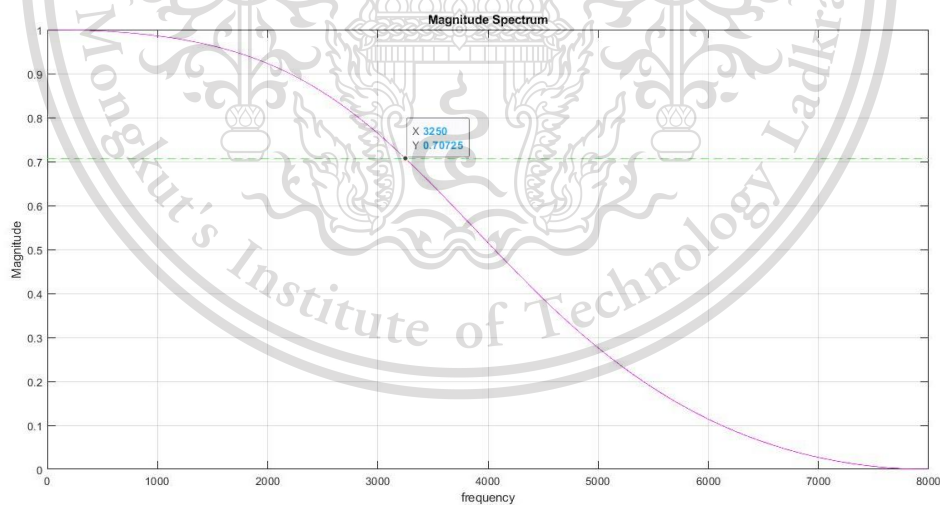
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Lowpass filter

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า มี zero อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 1 จุด และตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Lowpass filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร

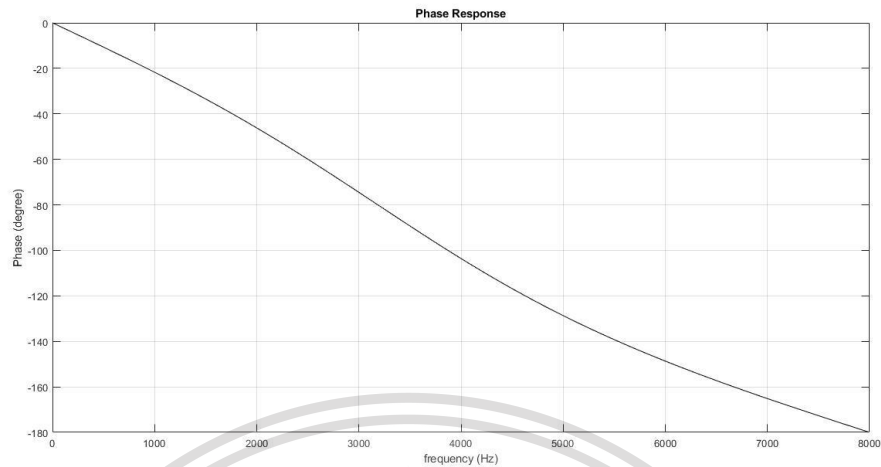


รูปที่ 4.4 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ passband edge frequency จะมีค่า magnitude อยู่ 0.707 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีข้างต้น  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Lowpass Filter

#### 4.1.1.2 2nd IIR Highpass filter

กำหนดให้ sampling frequency หรือ เท่ากับ 16 kHz และ passband edge frequency (0.707) อยู่ที่ 4.75 kHz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4 โดยจากทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังรูปที่ 4.6

```

Editor - J:\Jenny\Project\matlab\IIR\HPF_2nd.m
LPF_2nd.m  BSF_2nd.m  BPF_2nd.m  HPF_2nd.m  Kaiser_BSF.m  Kaiser_BPS.m
1 clear all;
2 clc;
3
4 Fs=16000; %sampling rate(Hz)
5 fc=4750; %cutoff frequency(Hz)
6 f0=fc; %center frequency
7 w=(2*pi*f0)/Fs
8 r=1-((f0/Fs)*pi);
9 K=(1+(2*r*cos(w))+r^2)/4
10 num=[K -2*K K]
11 den=[1 -2*r*cos(w) r^2]
12 [H,q] = freqz(num, den, 512, Fs);
13 figure(1)
14 zplane(num,den)
15 title('Z-plane')
16 figure(2)
17 plot(q,abs(H),'m');grid
18 title('Magnitude Spectrum')
19 xlabel('frequency'); ylabel('Magnitude')
20 figure(3)
21 plot(q,angle(H)*180/pi,'k');grid
22 title('Phase Response')
23 xlabel('frequency (Hz)'); ylabel('Phase (degree)')

```

รูปที่ 4.6 โปรแกรม 2nd IIR Highpass filter ใน Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์, กราฟ z-plane, Magnitude response และ Phase response ของ 2nd IIR Highpass filter ดังรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

```
Command Window

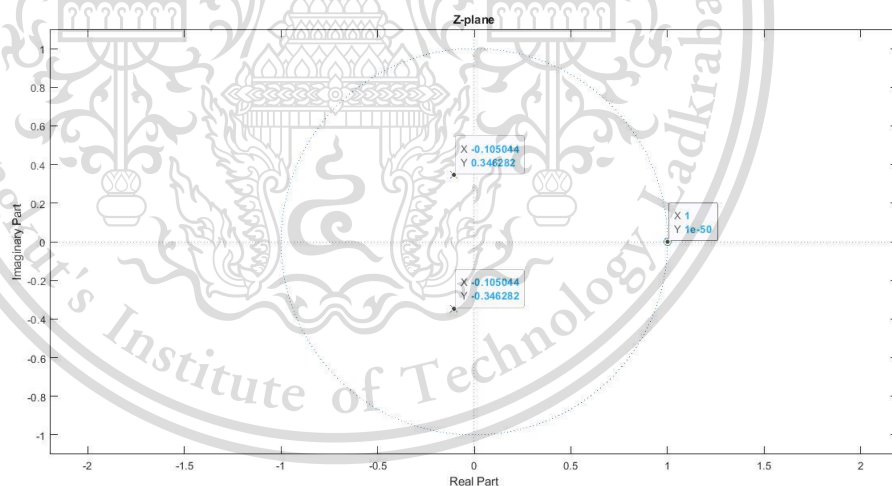
num =

    0.2414    -0.4827    0.2414

den =

    1.0000    0.0391    0.0045
```

รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของ IIR Highpass filter ที่ออกแบบโดยใช้ Poles-zeros placement



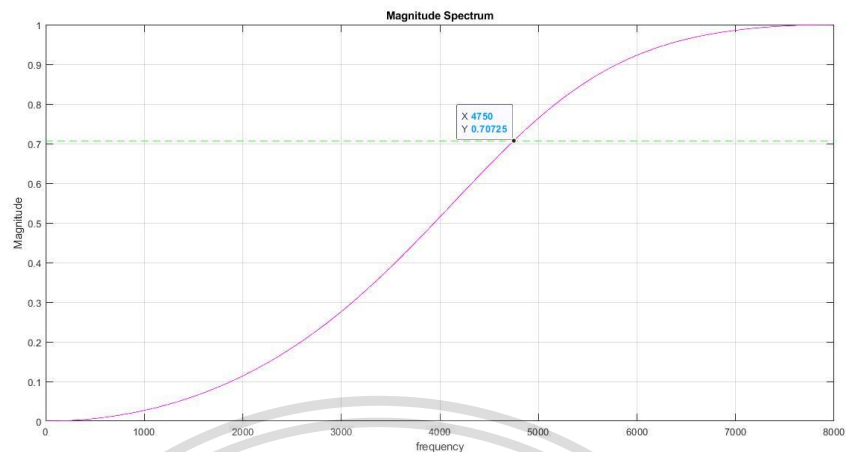
รูปที่ 4.7 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Highpass filter

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า มี zero อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 1 จุด และตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Highpass filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

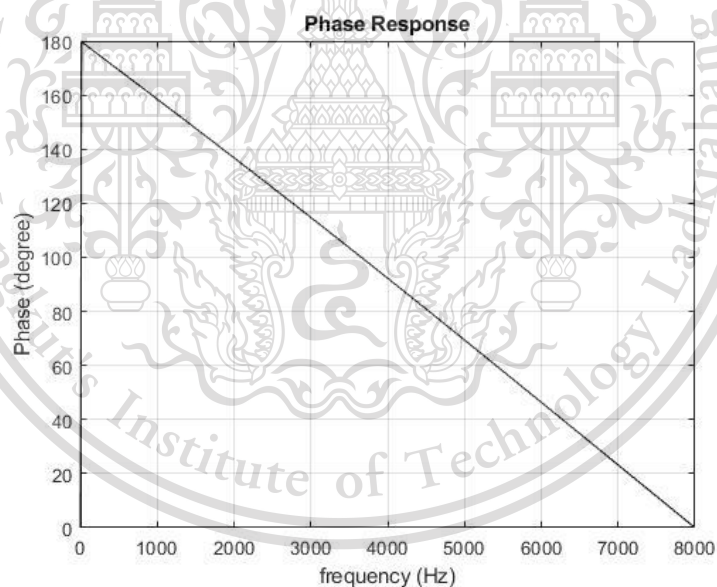
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ passband edge frequency จะมีค่า magnitude อยู่ 0.707 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีข้างต้น



รูปที่ 4.9 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Highpass Filter

#### 4.1.1.3 ทำการออกแบบ 2nd IIR Bandpass filter

โดยการออกแบบ 2nd IIR Bandpass filter กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz, center frequency ( $f_c$ ) เท่ากับ 3.25 kHz, Bandwidth (BW) เท่ากับ 500 Hz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางคณาจารย์

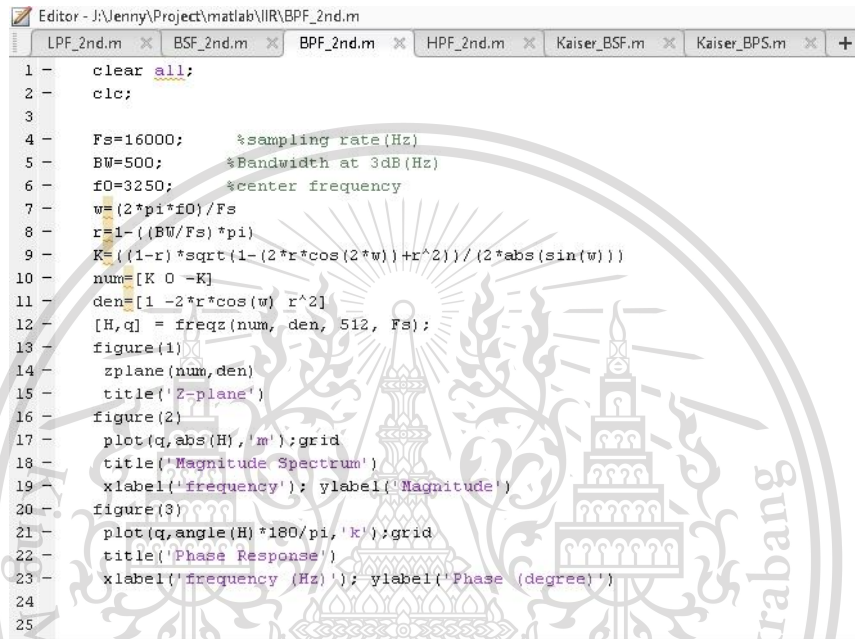
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$r = 1 - \left( \frac{BW}{F_s} \right) \pi \quad (4.5)$$

โดยจากทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังรูปที่ 4.10



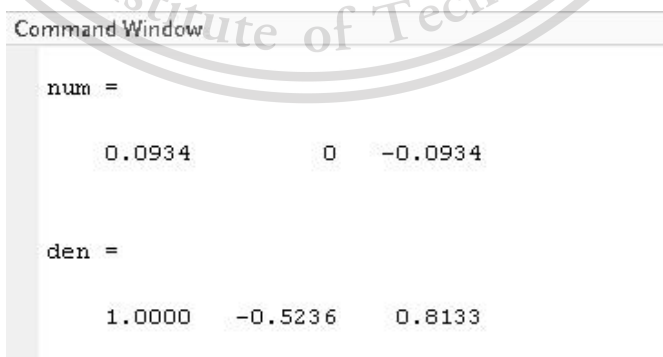
```

Editor - J:\Jenny\Project\matlab\IIR\BPF_2nd.m
LPF_2nd.m x BSF_2nd.m x BPF_2nd.m x HPF_2nd.m x Kaiser_BSF.m x Kaiser_BPS.m x +
1 - clear all;
2 - clc;
3
4 - Fs=16000; %sampling rate(Hz)
5 - BW=500; %Bandwidth at 3dB(Hz)
6 - f0=3250; %center frequency
7 - w=(2*pi*f0)/Fs
8 - r=1-(BW/Fs)*pi
9 - K=((1-r)*sqrt(1-(2*r*cos(w))+r^2))/(2*abs(sin(w)))
10 - num=[K 0 -K]
11 - den=[1 -2*r*cos(w) r^2]
12 - [H,q] = freqz(num, den, 512, Fs);
13 - figure(1)
14 - zplane(num,den)
15 - title('Z-plane')
16 - figure(2)
17 - plot(q,abs(H),'m');grid
18 - title('Magnitude Spectrum')
19 - xlabel('frequency'); ylabel('Magnitude')
20 - figure(3)
21 - plot(q,angle(H)*180/pi,'k');grid
22 - title('Phase Response')
23 - xlabel('frequency (Hz)'); ylabel('Phase (degree)')
24
25

```

รูปที่ 4.10 โปรแกรม 2nd IIR Bandpass filter ใน Matlab

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์, กราฟ z-plane, Magnitude response และ Phase response ของ 2nd IIR Bandpass filter ดังรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



```

Command Window
num =
    0.0934    0   -0.0934
den =
    1.0000   -0.5236    0.8133

```

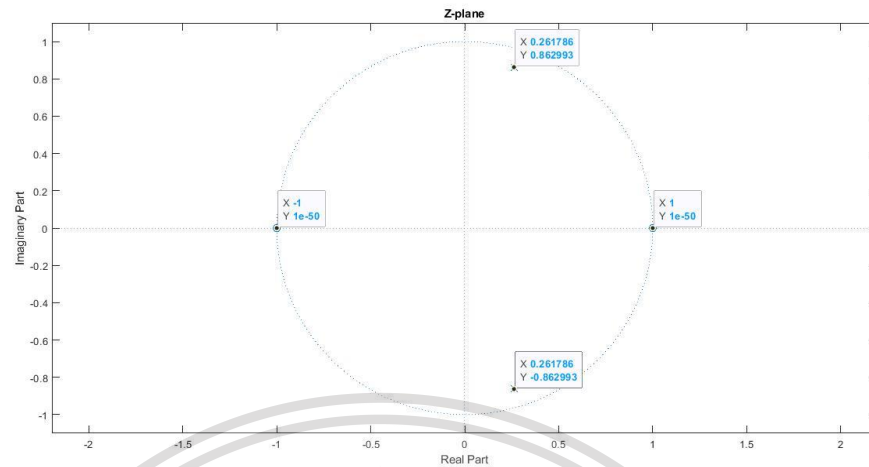
รูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์ของ IIR Bandpass filter ที่ออกแบบโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า Poles-zeros placement

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

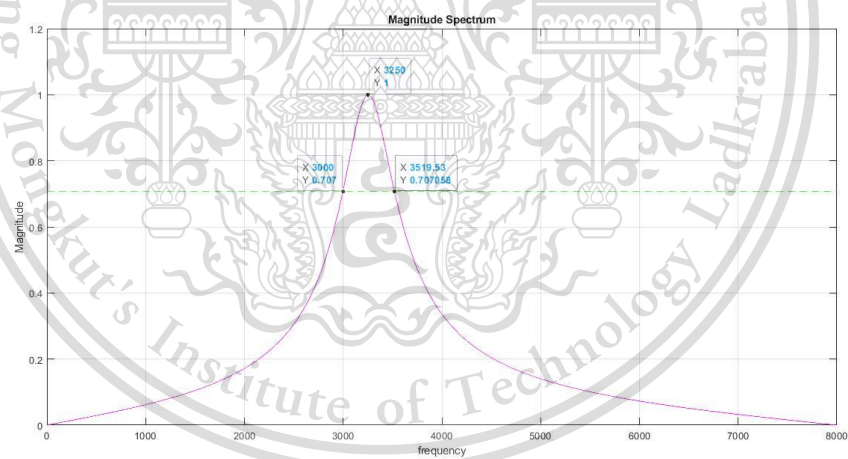
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Bandpass filter

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่ามี zeros อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 2 จุด และตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Bandpass filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร



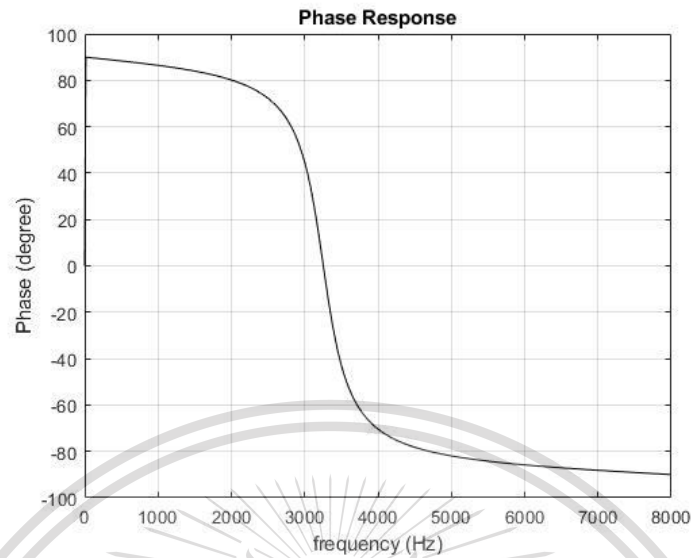
รูปที่ 4.13 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ Center frequency ตรงตามที่กำหนดไว้และที่ค่า magnitude ที่ 0.707 จะเป็นตำแหน่ง passband edge frequency ซึ่งตรงตำแหน่งนั้น สามารถนำไปหาค่า bandwidth ได้ด้วยการนำตำแหน่งที่ passband edge frequency ทั้งสองมาลบกัน หรือที่ตำแหน่ง Center frequency ลบออกด้วย bandwidth/2 ซึ่งจะได้ค่า BW ออกมาใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Bandpass Filter

#### 4.1.1.4 ทำการออกแบบ 2nd IIR Bandstop filter

โดยการออกแบบ 2nd IIR Bandstop filter กำหนดให้ sampling frequency หรือ  $F_s$  เท่ากับ 16 kHz, center frequency ( $f_c$ ) เท่ากับ 3.25 kHz, Bandwidth (BW) เท่ากับ 500 Hz และ  $r$  เป็นรัศมีของ poles ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5 โดยจากทฤษฎีและหลักการข้างต้น สามารถนำมาเขียนโปรแกรมใน Matlab ได้ดังรูปที่ 4.15

```

Editor - J:\Jenny\Project\matlab\IIR\BSF_2nd.m
LPF_2nd.m  BSF_2nd.m  BPF_2nd.m  HPF_2nd.m  Kaiser_BSF.m  Kaiser_BPS.m
1 - clear all;
2 - clc;
3
4 - Fs=16000;    %sampling rate(Hz)
5 - BW=1250;    %Bandwidth at 3dB(Hz)
6 - f0=3250;    %center frequency
7 - w=(2*pi*f0)/Fs
8 - r=1-((pi/20)/2)
9 - K=((1-(2*r*cos(w))+r^2)/(2-2*cos(w)))
10 - num=[K -2*K*cos(w) K]
11 - den=[1 -2*r*cos(w) r^2]
12 - [H,q] = freqz(num, den, 512, Fs);
13 - figure(1)
14 - zplane(num,den)
15 - title('Z-plane')
16 - figure(2)
17 - plot(q,abs(H),'m');grid
18 - title('Magnitude Spectrum')
19 - xlabel('frequency'); ylabel('Magnitude')
20 - figure(3)
21 - plot(q,angle(H)*180/pi,'k');grid
22 - title('Phase Response')
23

```

รูปที่ 4.15 โปรแกรม 2nd IIR Bandstop filter ใน Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการรันโปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์, กราฟ z-plane, Magnitude response และ Phase response ของ 2nd IIR Bandpass filter ดังรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

```
Command Window

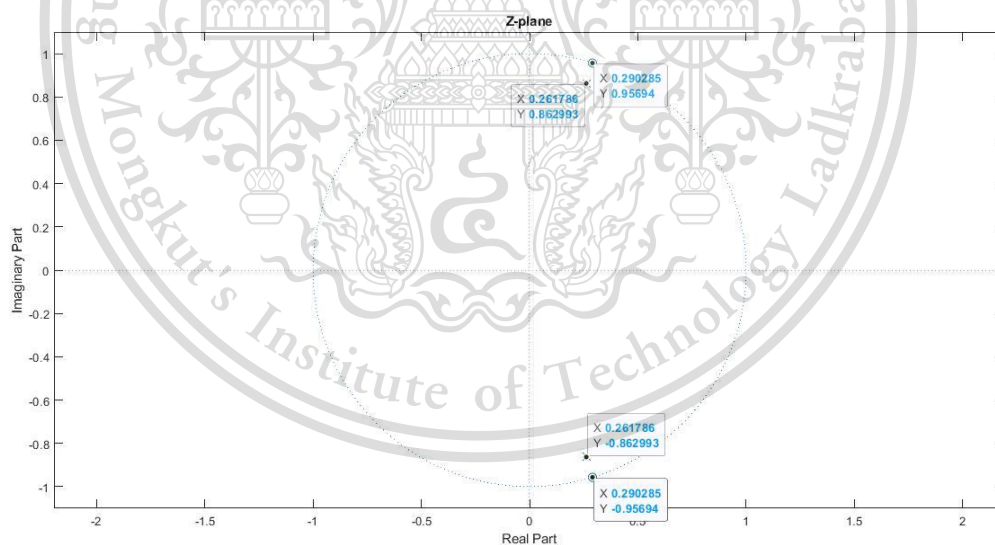
num =

    0.9258   -0.5375    0.9258

den =

    1.0000   -0.5350    0.8491
```

รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์ของ IIR Bandstop filter ที่ออกแบบโดยใช้ Poles-zeros placement



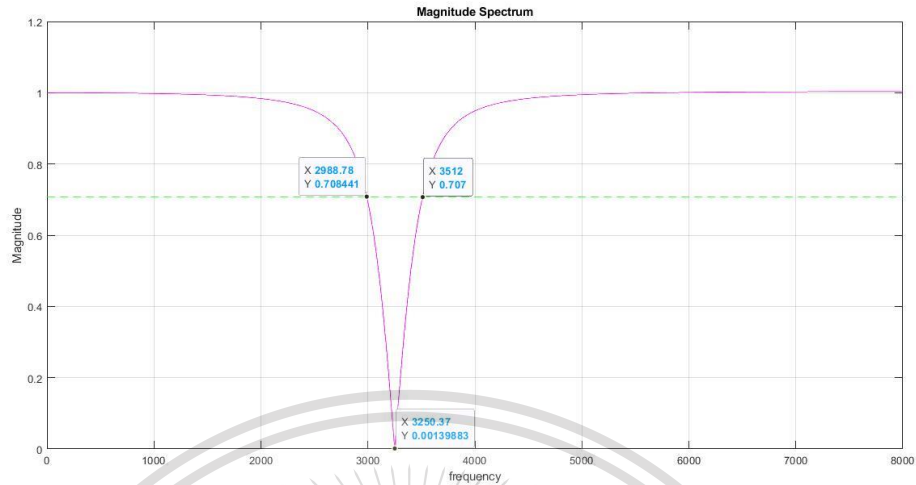
รูปที่ 4.17 กราฟ z-plane ของ 2nd IIR Bandstop filter

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่ามี zero อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย จำนวน 2 จุดและตำแหน่งของ Poles อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย แสดงว่าระบบ 2nd IIR Bandstop filter ที่ออกแบบนั้นมีความเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

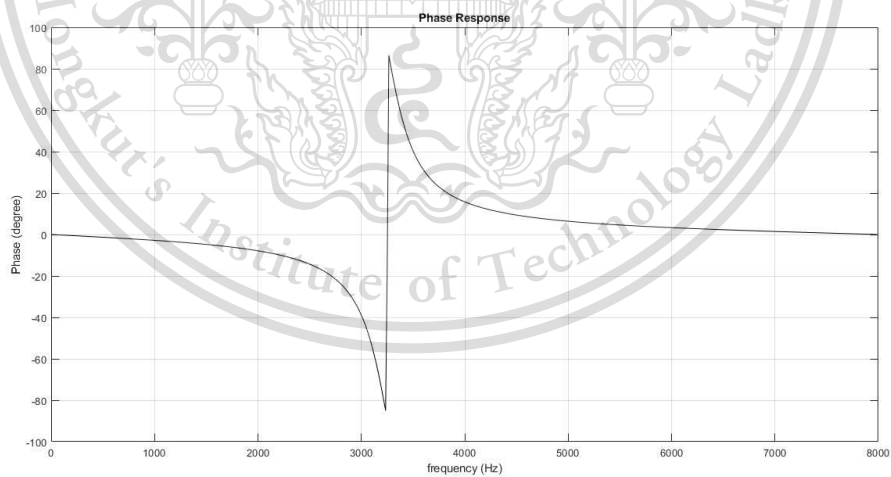
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.18 กราฟ Magnitude response ของ 2nd IIR Bandstop Filter

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของ Center frequency ตรงตามที่กำหนดไว้และที่ค่า magnitude ที่ 0.707 จะเป็นตำแหน่ง passband edge frequency ซึ่งตรงตำแหน่งนั้น สามารถนำไปหาค่า bandwidth ได้ด้วยการนำตำแหน่งที่ passband edge frequency ทั้งสองมาลบกัน หรือที่ตำแหน่ง Center frequency ลบออกด้วย bandwidth/2 ซึ่งจะได้ค่า BW ออกมาใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.19 กราฟ Phase response ของ 2nd IIR Bandstop Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

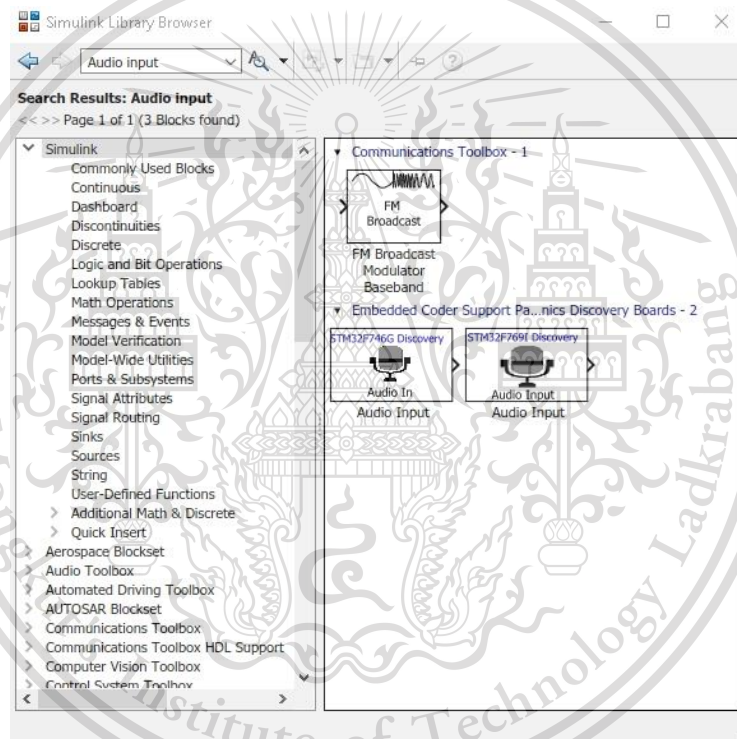
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.1.2.1 Simulink

เป็นการออกแบบ 2nd IIR filter ทั้ง 4 ชนิดด้วยการต่อบล็อก Simulink แบบสำเร็จในโปรแกรม Matlab ดังนี้

##### 1) 2nd IIR Lowpass filter

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Audio Input แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Input ดังรูปที่ 4.19 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 บล็อก Audio Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

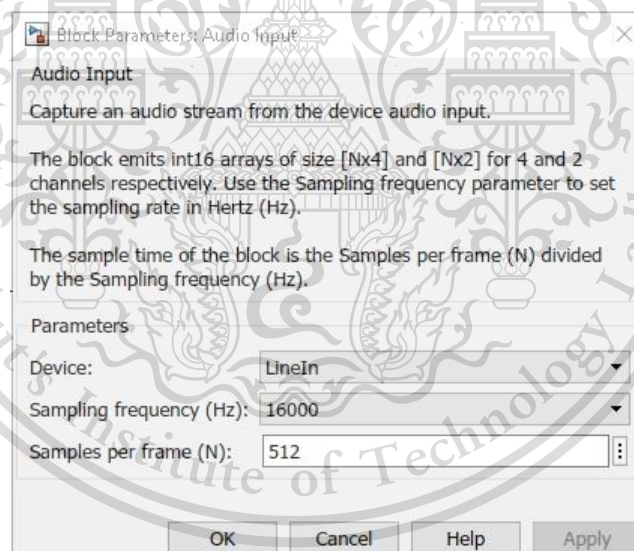
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

untitled



รูปที่ 4.20 ลากบล็อก Audio Input ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Input โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 16,000 Hz, Device เป็น LineIn และ Samples per frame เป็น 512 ดังรูปที่ 4.21



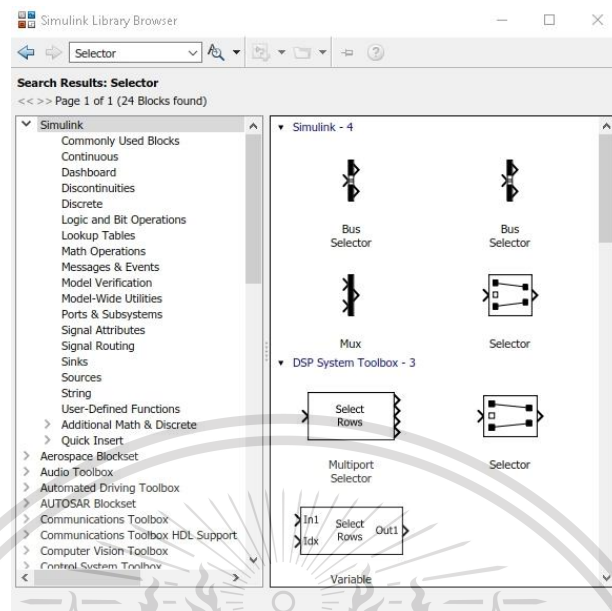
รูปที่ 4.21 การตั้งค่าบล็อก Audio Input

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องชองค้นหา Selector แล้วทำการเลือกบล็อก Selector ดังรูปที่ 4.22 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector ดังรูปที่ 4.23

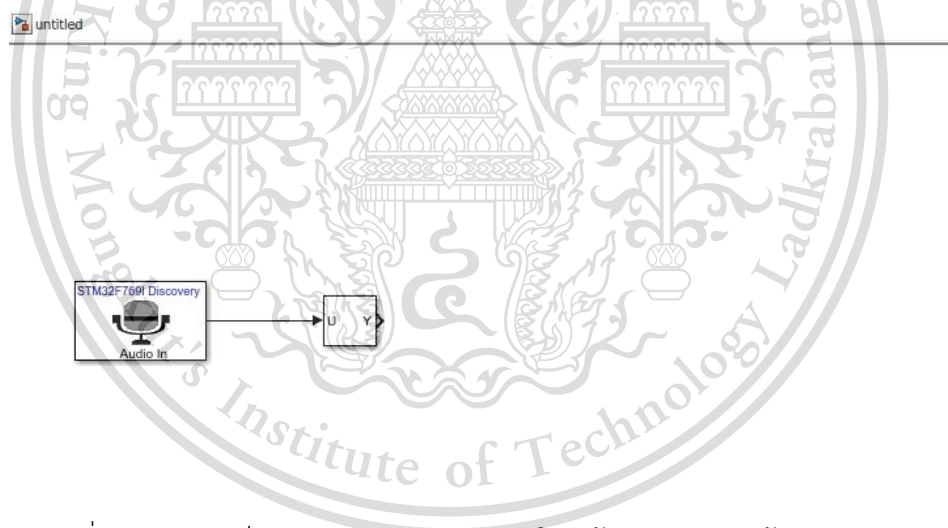
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.22 บล็อก Selector



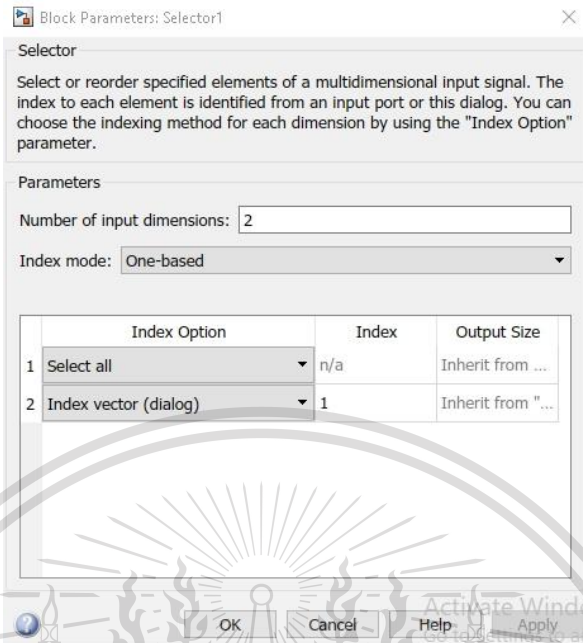
รูปที่ 4.23 ลากบล็อก Selector ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector

ทำการตั้งค่าบล็อก Selector โดยกำหนดให้ Number of input dimensions เป็น 2 และ Index mode เป็น One-based ดังรูปที่ 4.24 แล้วทำการกด OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

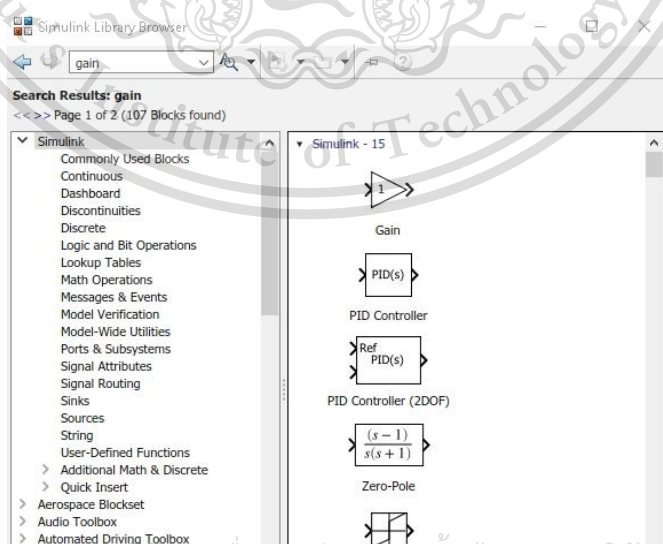
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.24 การตั้งค่าบล็อก Selector

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 4.25 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain ดังรูปที่ 4.26

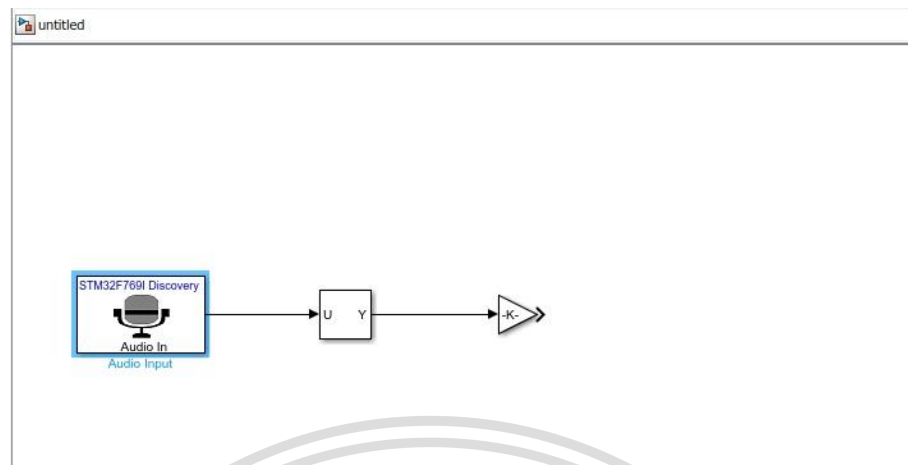


4.25 บล็อก Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

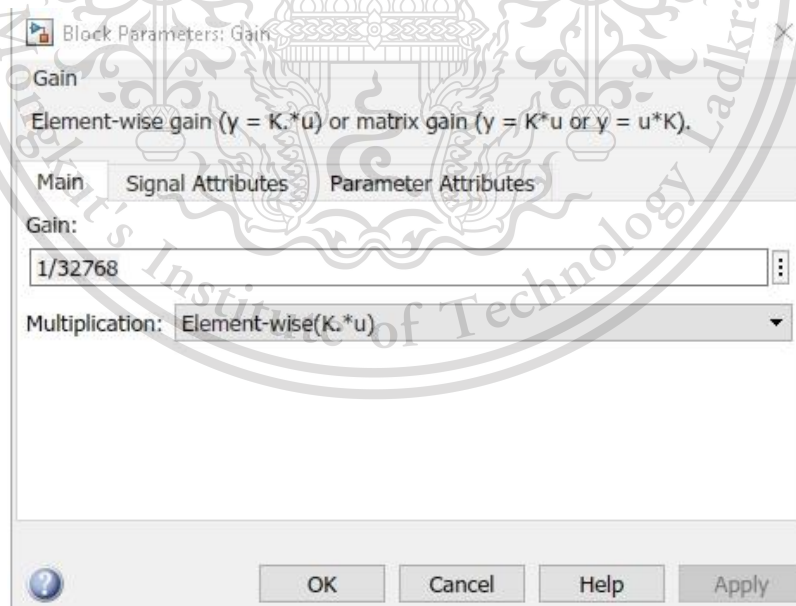
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.26 ลากบล็อก Gain ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain

ทำการตั้งค่าบล็อก Gain โดยกำหนดให้ค่า Gain เป็น  $1/32768$ , Multiplication เป็น Element-wise( $K.*u$ ), Output data type เป็น int16 และ Integer rounding mode เป็น Floor ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ แล้วทำการกด OK

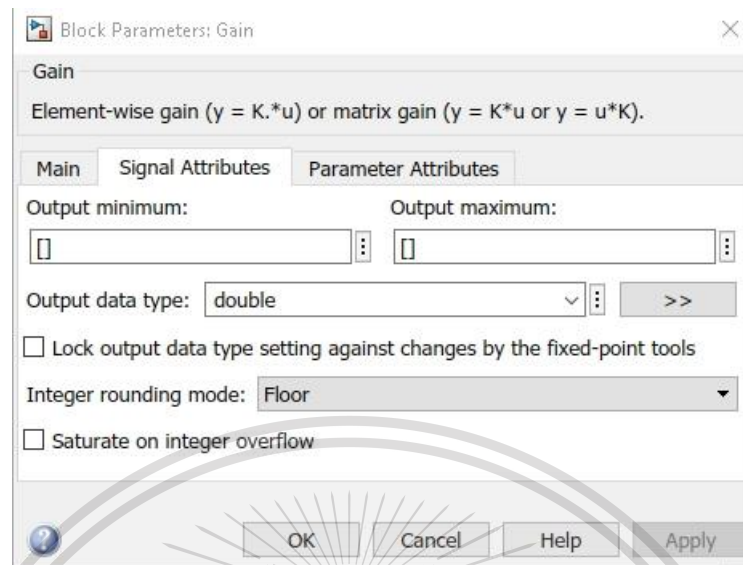


รูปที่ 4.27 การตั้งค่าบล็อก Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

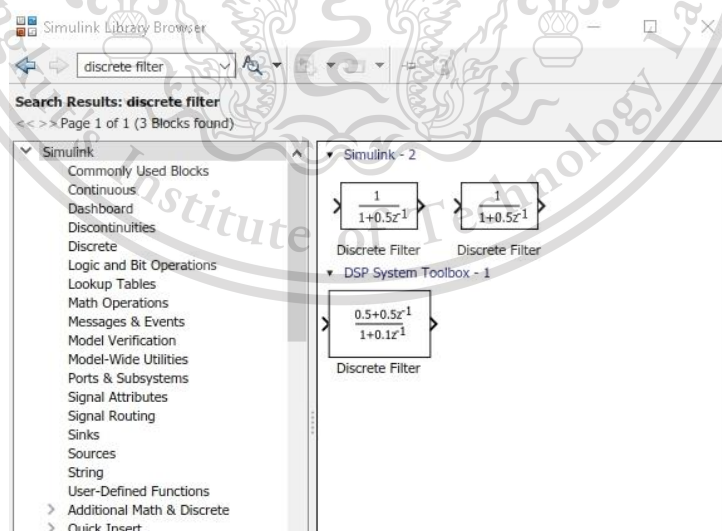
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.28 การตั้งค่าบล็อก Gain

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 4.29 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete Filter ดังรูปที่ 4.30

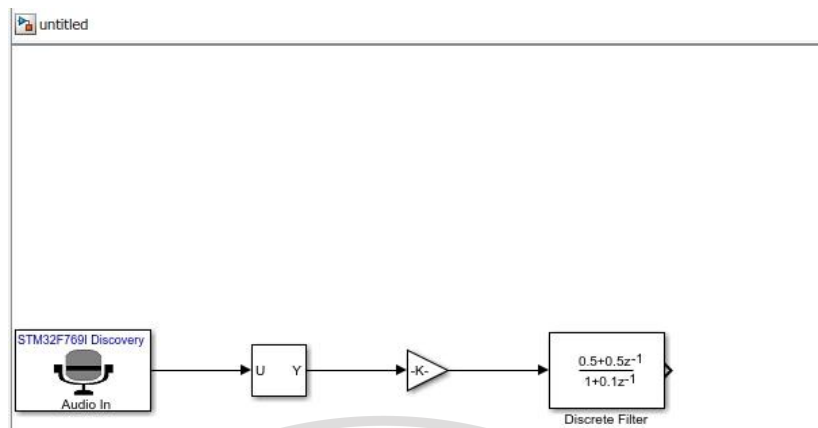


4.29 บล็อก Discrete Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

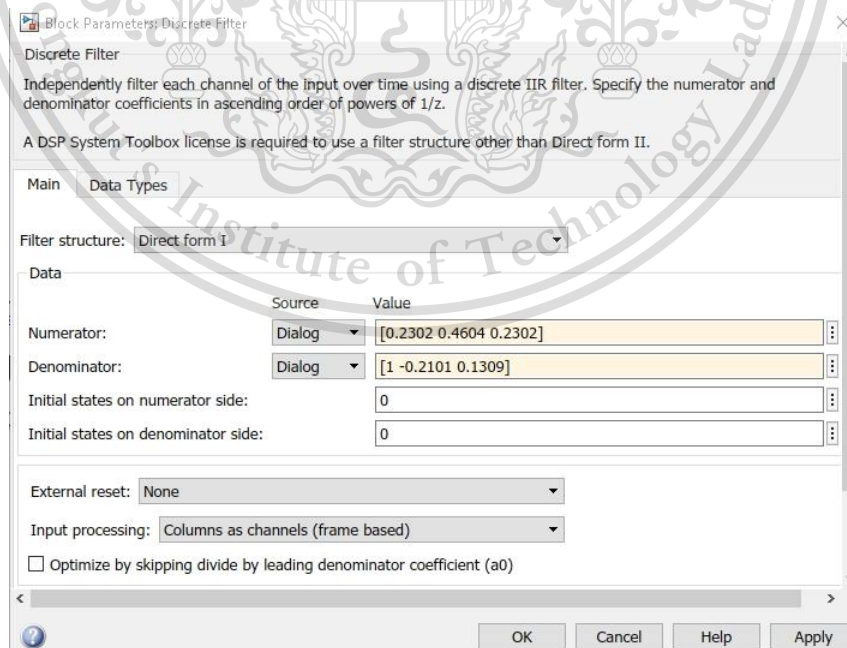
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.30 ลากบล็อก Discrete Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete Filter

ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete Filter โดยกำหนดให้ Filter structure เป็น Direct form I, Numerator และ Denominator เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Lowpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.1.1, Initial state ทั้งสอง side เป็น 0, External reset เป็น None และ Input processing เป็น Columns as channels (frame based) ดังรูปที่ 4.31 จากนั้นทำการกด OK

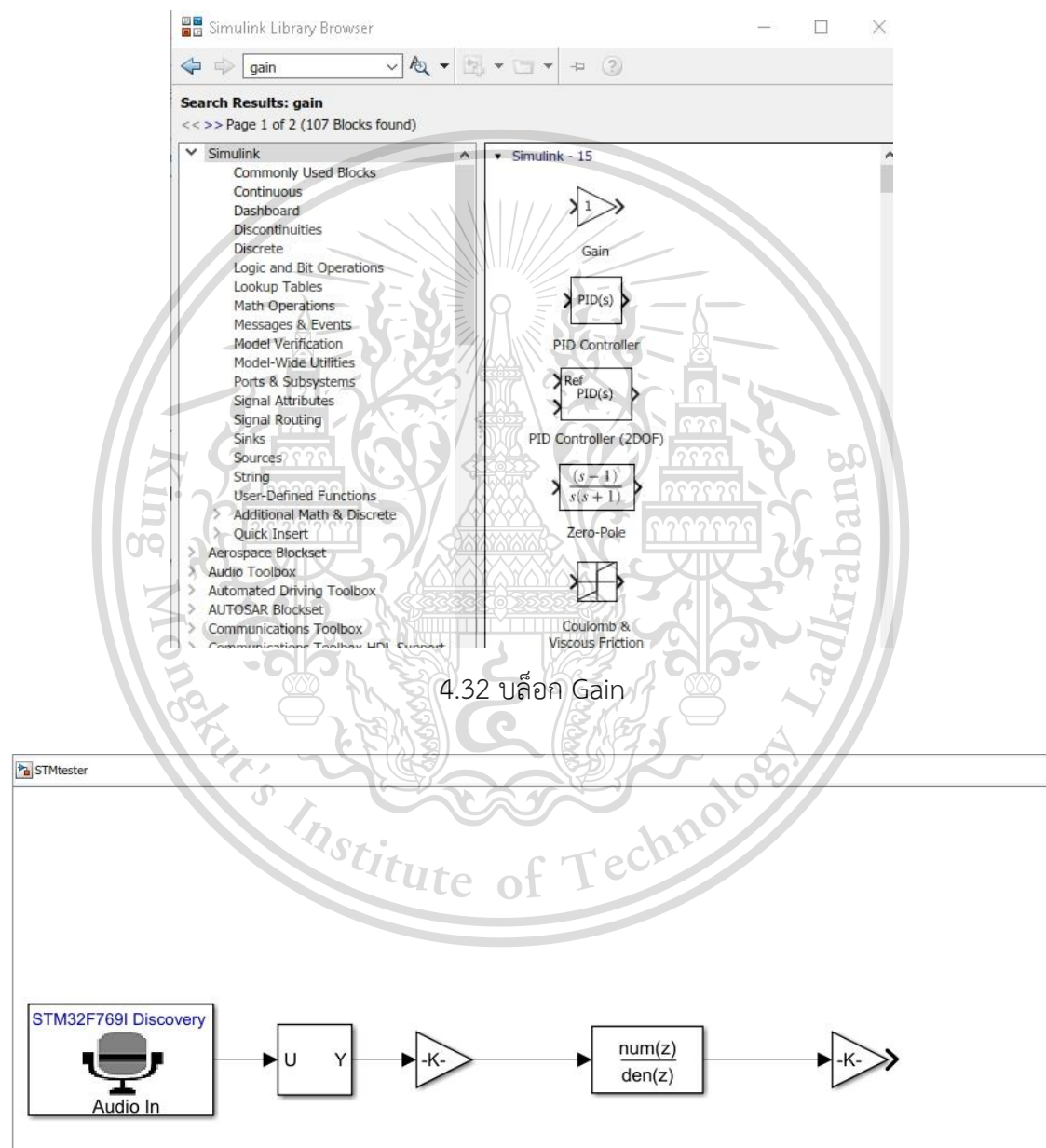


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.31 การตั้งค่าบล็อก Discrete Filter  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 4.32 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Discrete Filter และ Gainr ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ลากบล็อก Gain ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

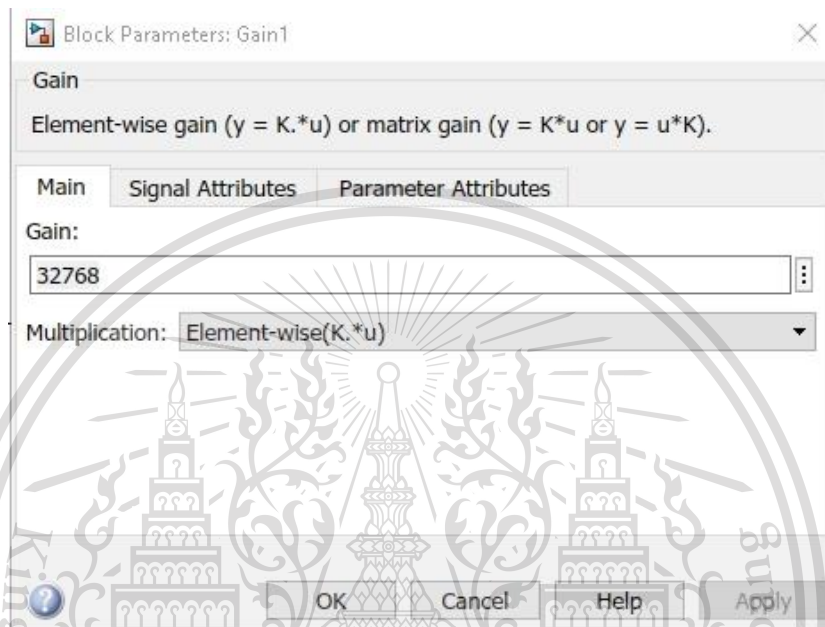
และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Discrete Filter และ Gainr ดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

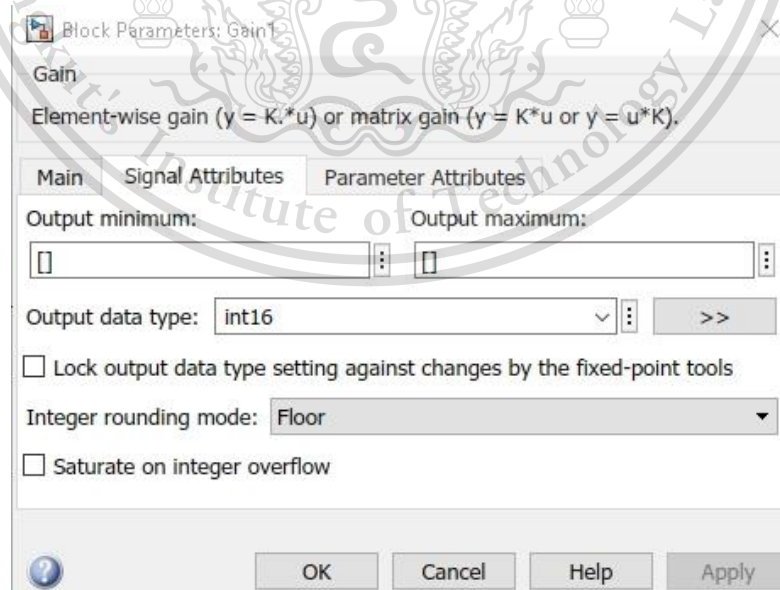
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Gain โดยกำหนดให้ค่า Gain เป็น 32768, Multiplication เป็น Element-wise( $K \cdot u$ ), Output data type เป็น int16 และ Integer rounding mode เป็น Floor ดังรูปที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ แล้วทำการกด OK



รูปที่ 4.34 การตั้งค่าบล็อก Gain ตัวที่ 2

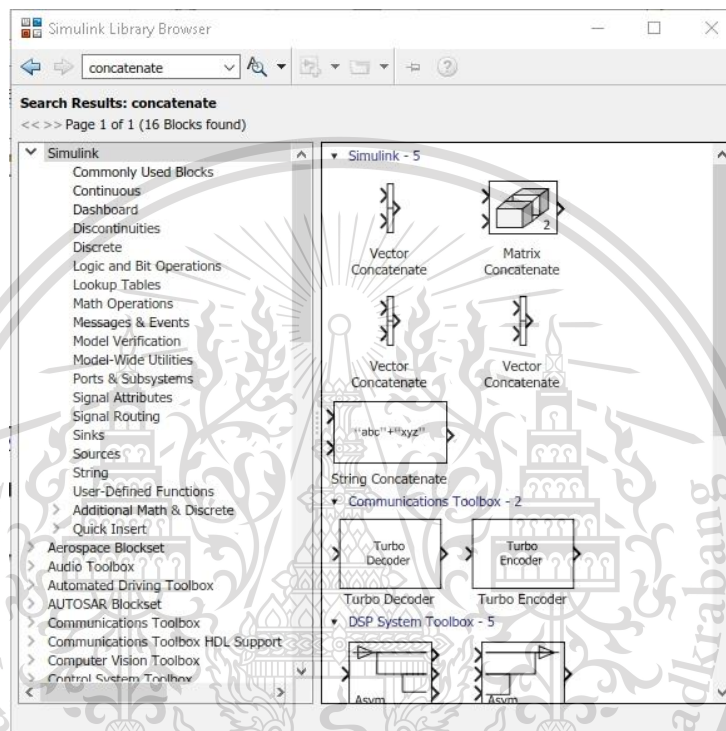


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกจาด้านวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.35 การตั้งค่าบล็อก Gain ตัวที่ 2  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

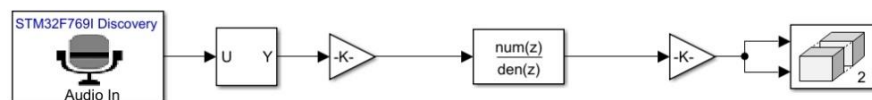
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate ดังรูปที่ 4.36 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 4.37



4.36 บล็อก Matrix Concatenate

STMester

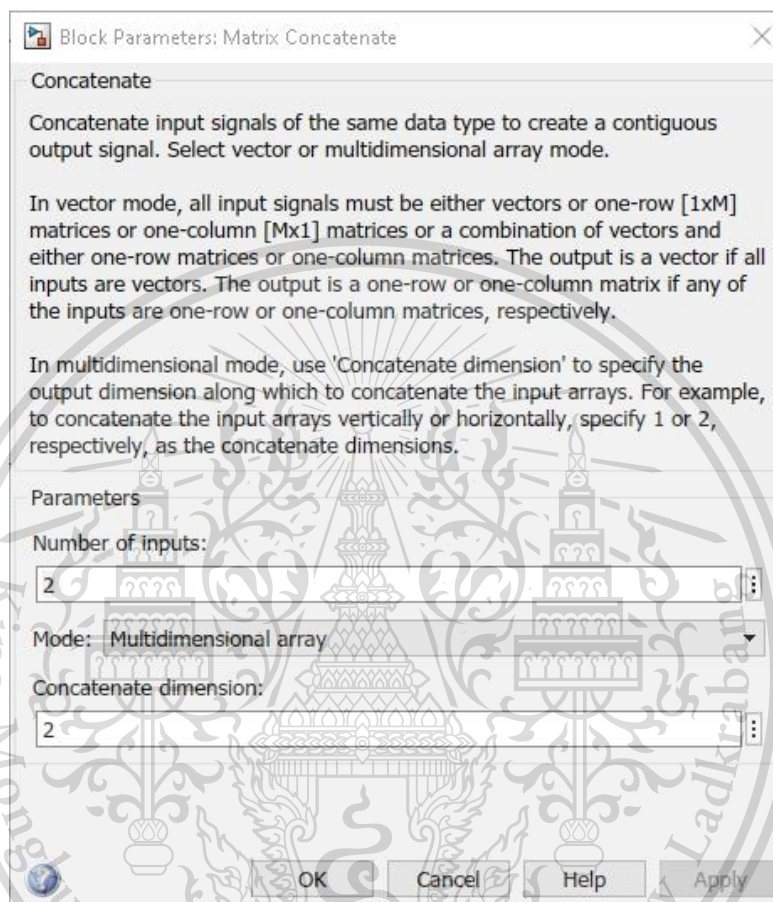


รูปที่ 4.37 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดให้ Number of inputs เป็น 2, Mode เป็น Multidimensional array และ Concatenate เป็น 2 ดังรูปที่ 4.38



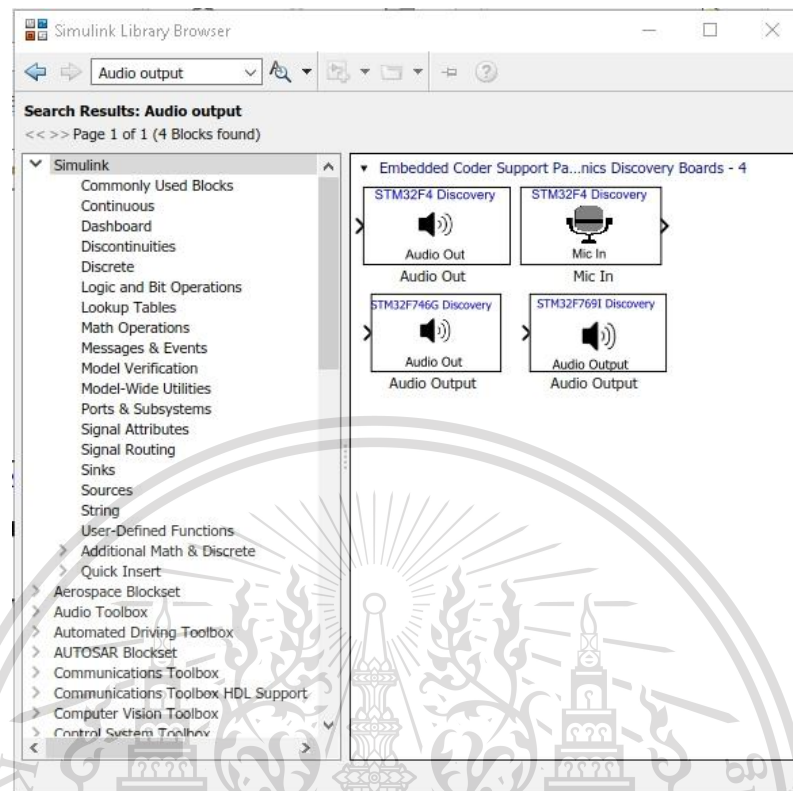
รูปที่ 4.38 การตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Audio Output แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Output ดังรูปที่ 4.39 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Output และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 4.40

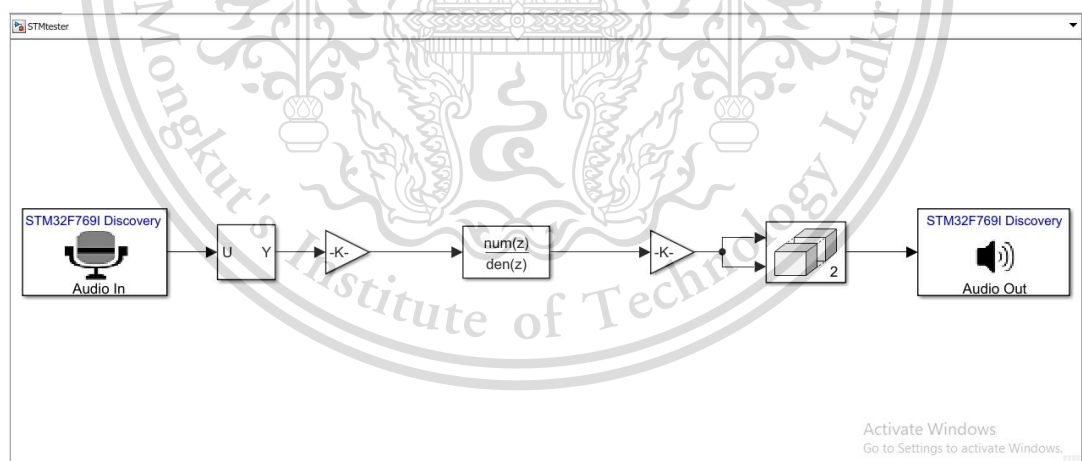
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



4.39 บล็อก Audio Output



รูปที่ 4.40 ลากบล็อก Audio Output ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matrix Concatenate และ Audio Output

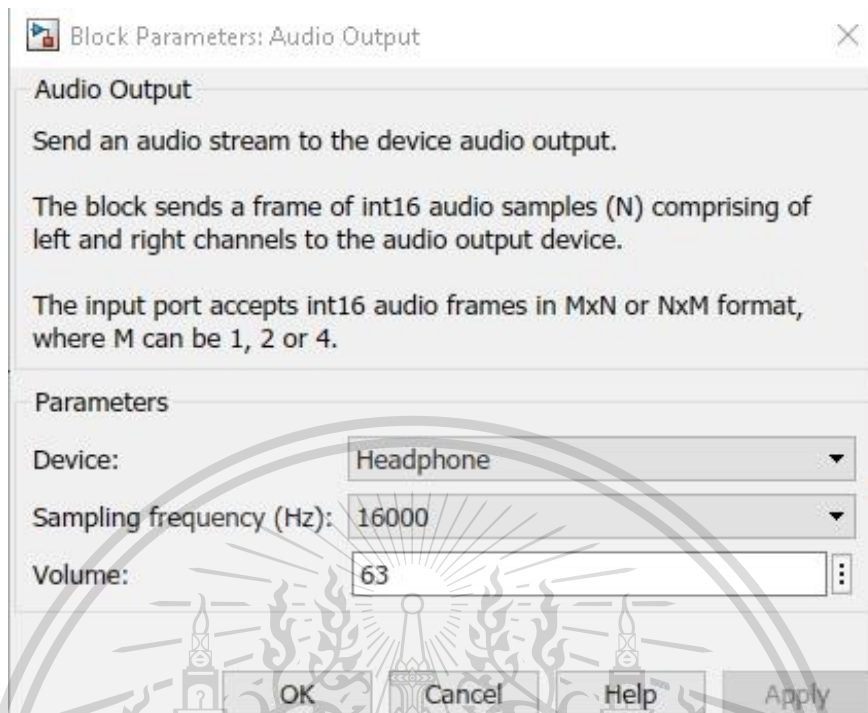
ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Output โดยกำหนดให้ Sampling

Frequency เป็น 16,000 Hz, Device เป็น Headphone และ Volume เป็น 63 ดังรูปที่ 4.41

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

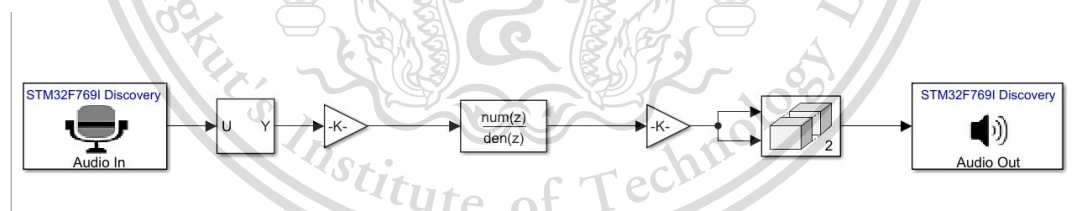
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.41 การตั้งค่าบล็อก Audio Output

จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ FIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR Lowpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Poles-zeroes placement

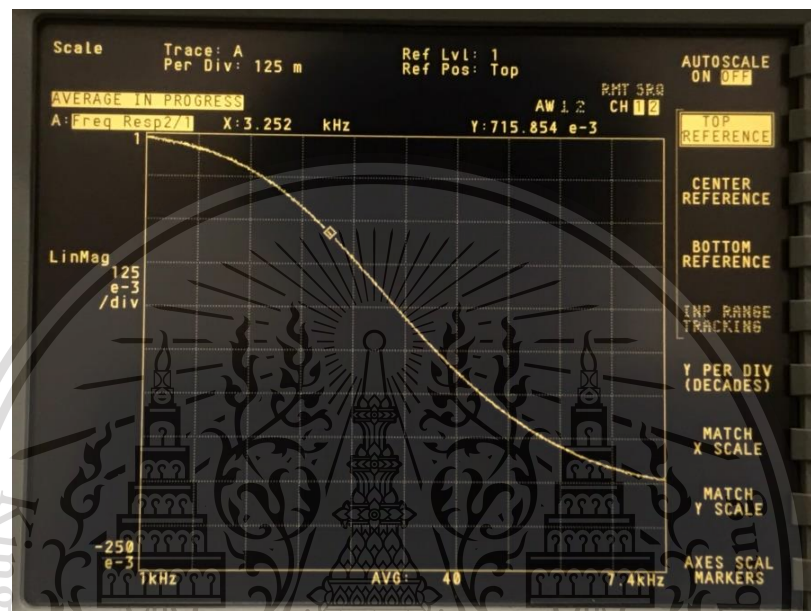
เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Poles-zeroes placement โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 4.42 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.43 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.25 kHz มีค่าประมาณ 0.716 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 4.43 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter

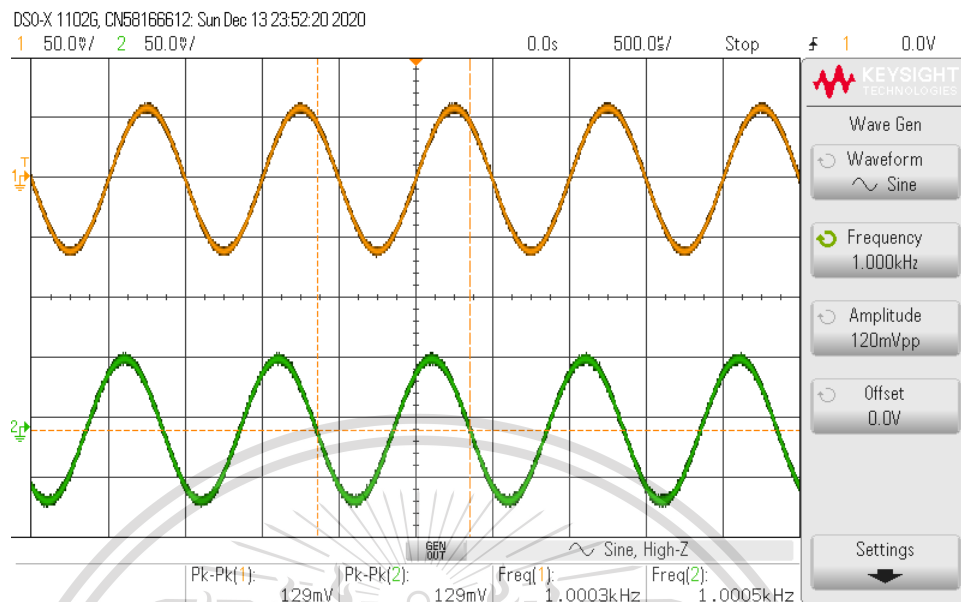
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

- 1.1) ป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.44 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

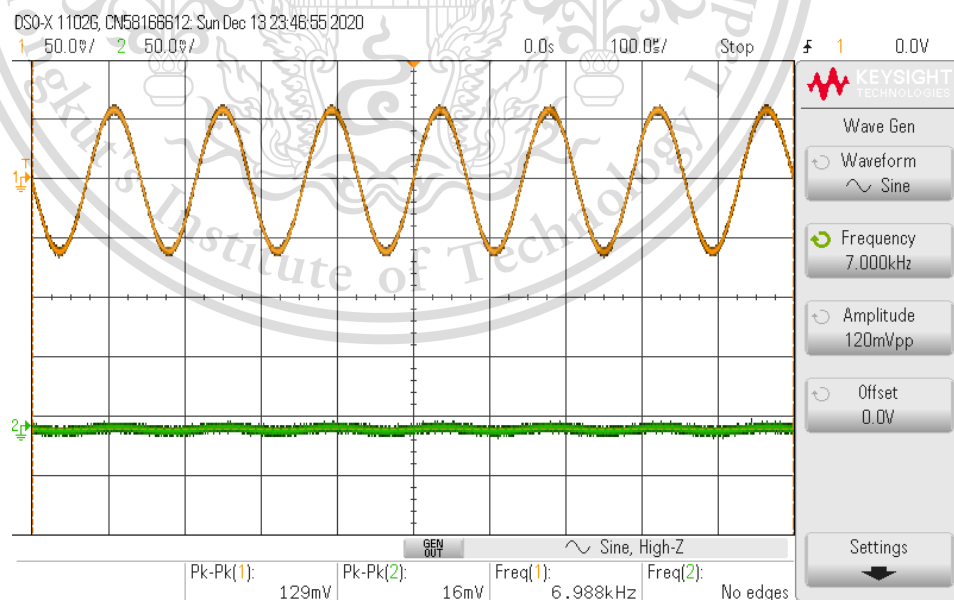
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.44 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1kHz ของ 2nd IIR Lowpass Filter

1.2) ป้อนสัญญาณซายน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.45 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.45 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 7 kHz ของ 2nd IIR Lowpass Filter นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

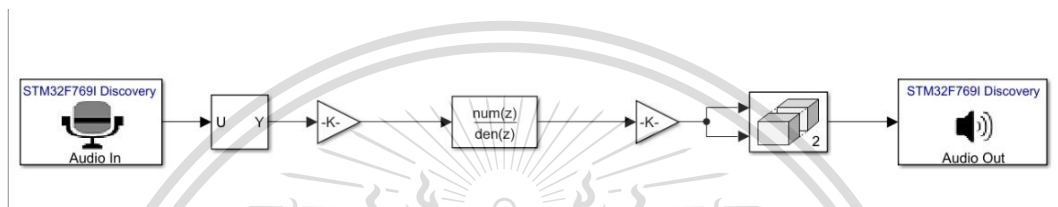
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) 2nd IIR Highpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ 2nd IIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ในบล็อก Discrete Filter เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Highpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 4.6 ในหัวข้อที่ 4.1.2 จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Poles-zeroes placement ดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR Highpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

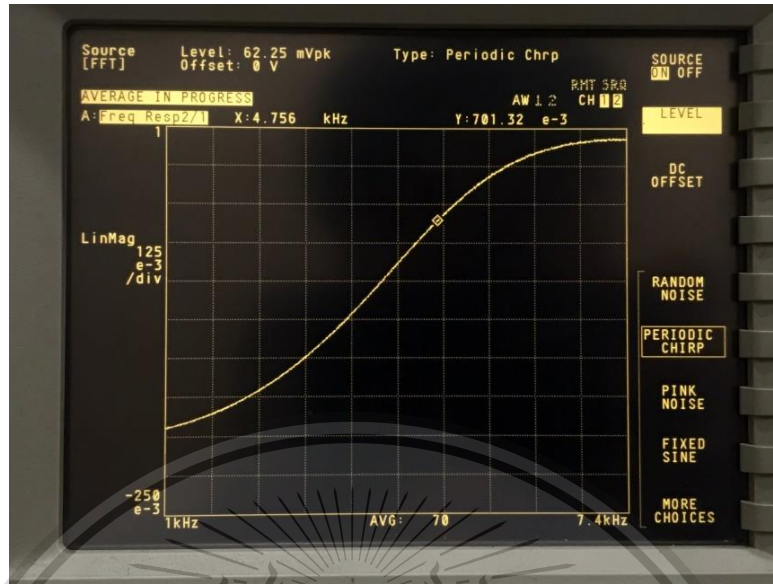
เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR highpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.46 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.47 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 4.75 kHz มีค่าประมาณ 0.701 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

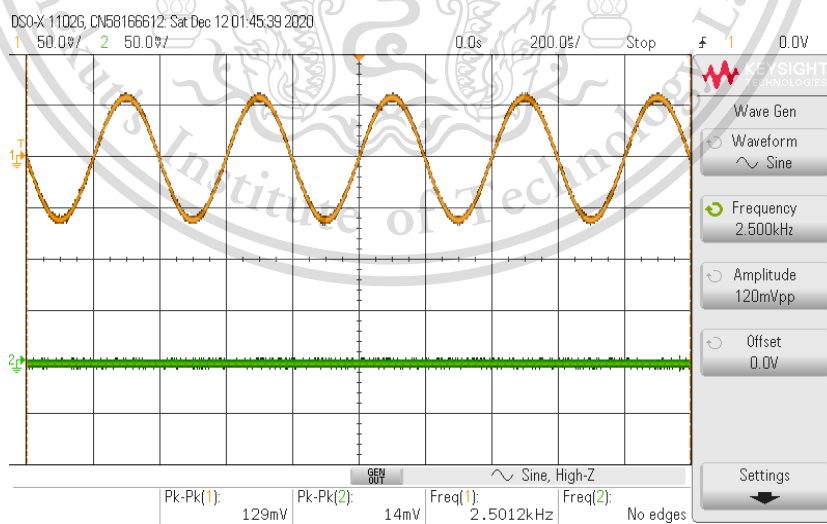
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.47 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ 2.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.48 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



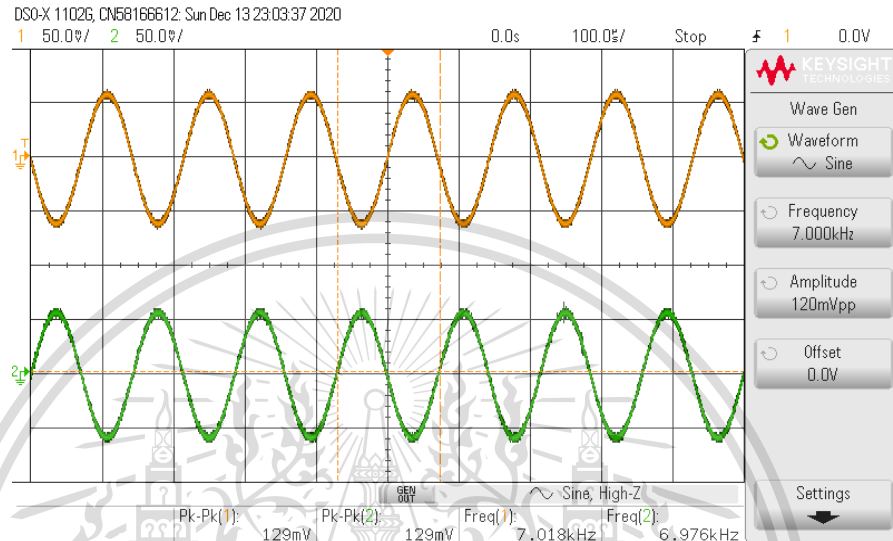
รูปที่ 4.48 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

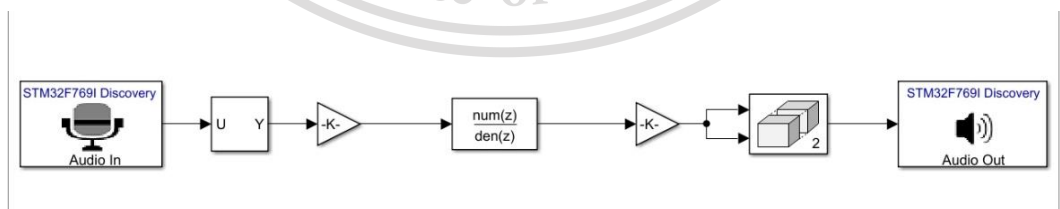
2.2) ป้อนสัญญาณซายน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.49 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณ  
 อินพุต



รูปที่ 4.49 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz  
 ของ 2nd IIR Highpass Filter

### 3) 2nd IIR Bandpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอน  
 เดียวกันกับ 2nd IIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ในบล็อก  
 Discrete Filter เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Bandpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม  
 Matlab ดังรูปที่ 4.11 ในหัวข้อที่ 4.1.3 จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR  
 Bandpass filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Poles-zeroes placement ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR Bandpass filter  
 ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

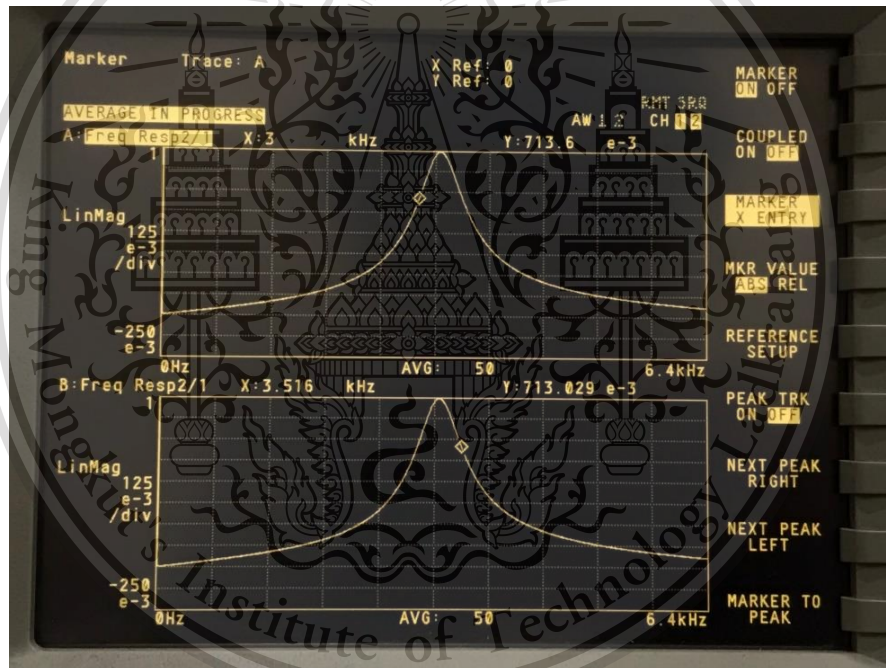
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR bandpass filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 3.46 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.51 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าประมาณ 0.714 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 4.51 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter

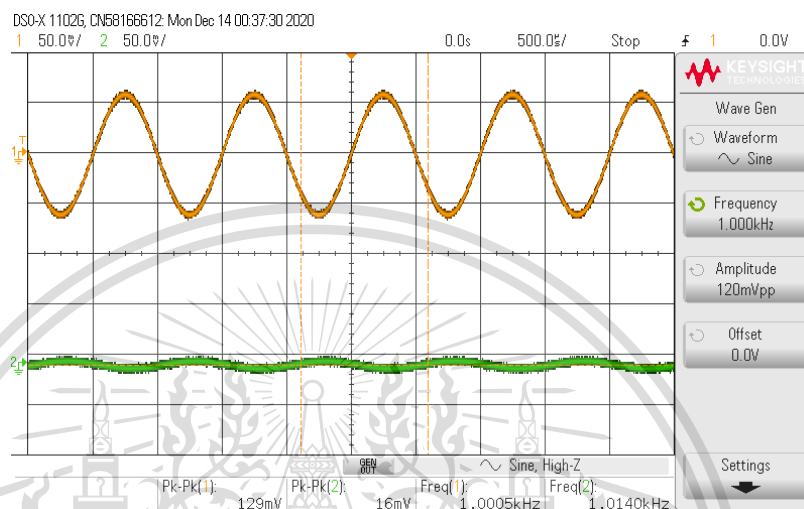
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

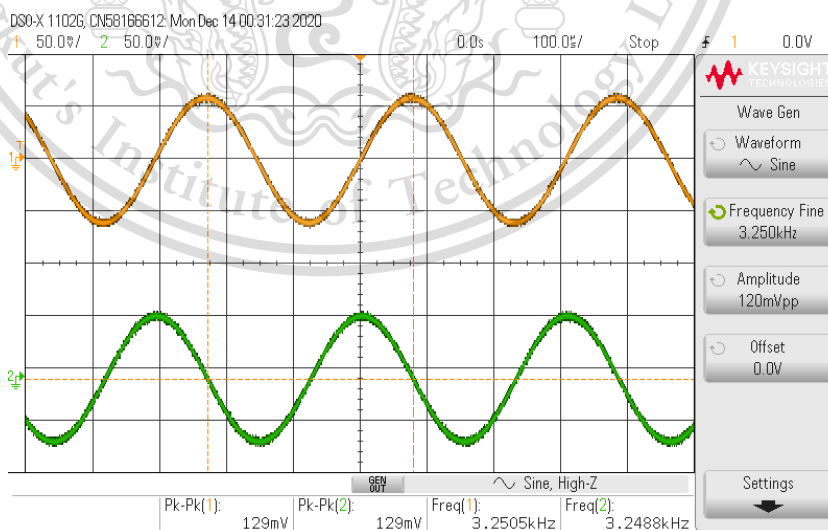
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.52 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.52 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter

3.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.53 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



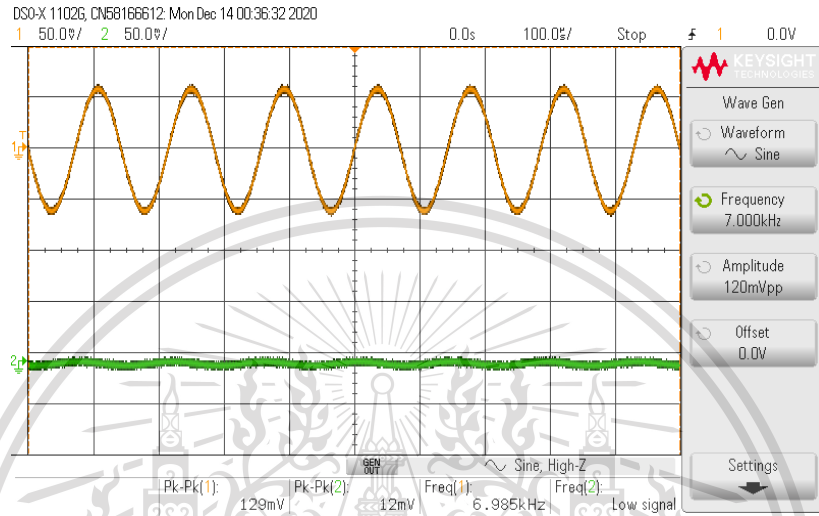
รูปที่ 4.53 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 3.25 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

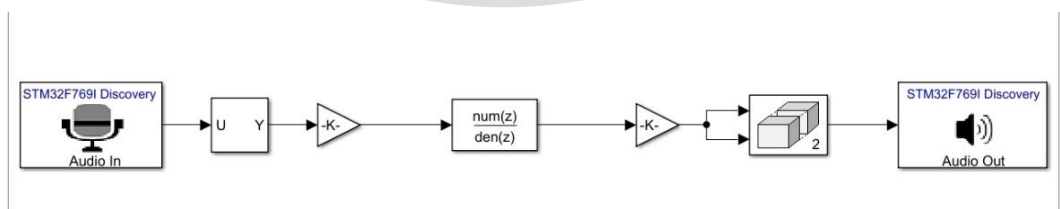
3.3) บ่อนสัญญาณซายน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp  
 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.54 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่า  
 แอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.54 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการบ่อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่  
 7 kHz ของ 2nd IIR Bandpass Filter

4) 2nd IIR Bandstop filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอน  
 เดียวกันกับ 2nd IIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ในบล็อก  
 Discrete Filter เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Bandpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม  
 Matlab ดังรูปที่ 4.16 ในหัวข้อที่ 4.1.4 จะได้วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR  
 Bandstop filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Poles-zeroes placement ดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 วงจร Simulink แบบบล็อกสำเร็จของ 2nd IIR Bandpass filter  
 ที่ออกแบบด้วยวิธี Kaiser window function

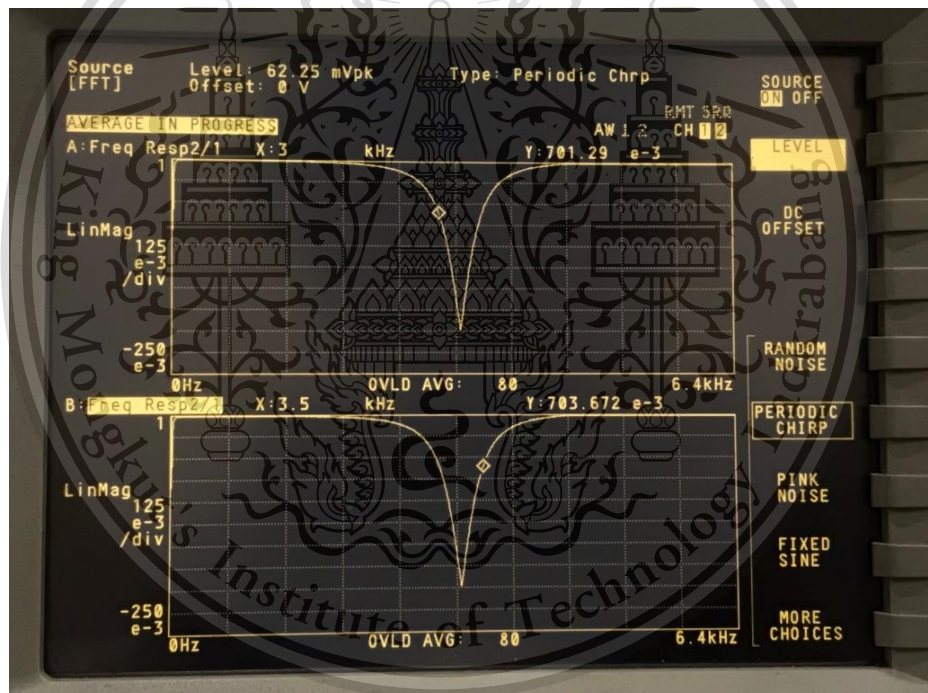
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR bandstop filter ที่ออกแบบด้วย Kaiser window function โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 4.55 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.56 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าประมาณ 0.701 และ 0.704 ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 4.56 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandstop Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก Discrete FIR Filter

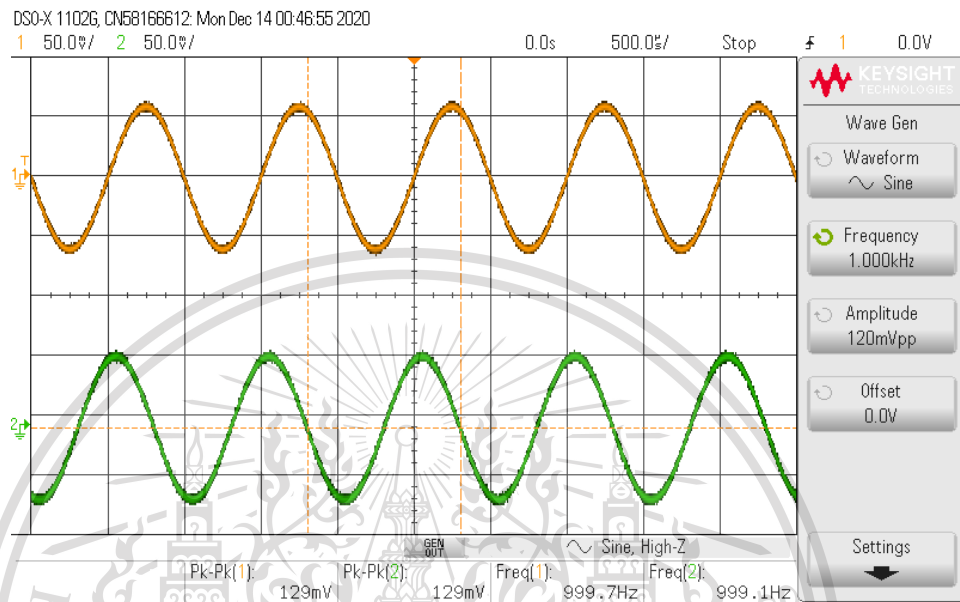
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.57 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



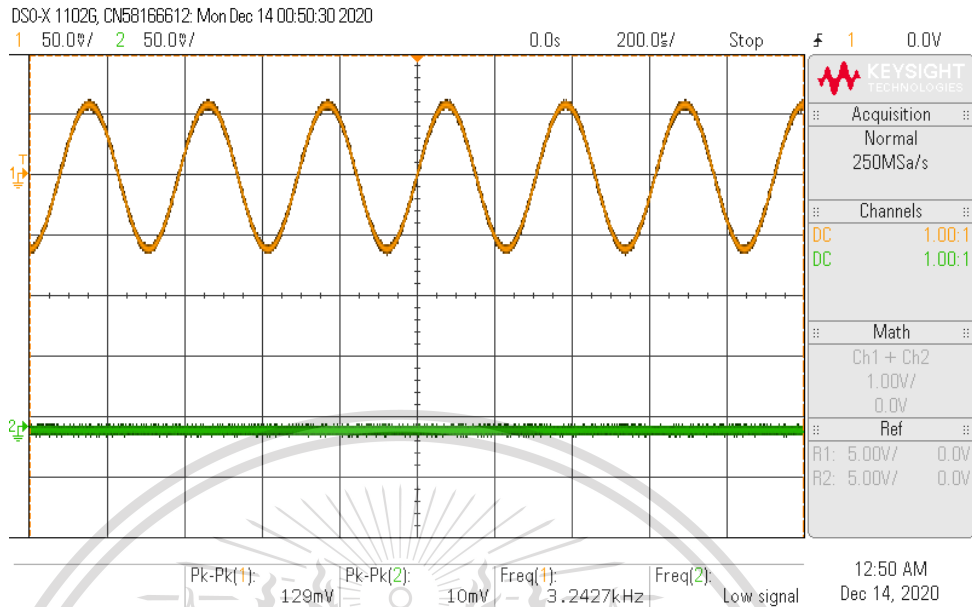
รูปที่ 4.57 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter

4.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.58 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

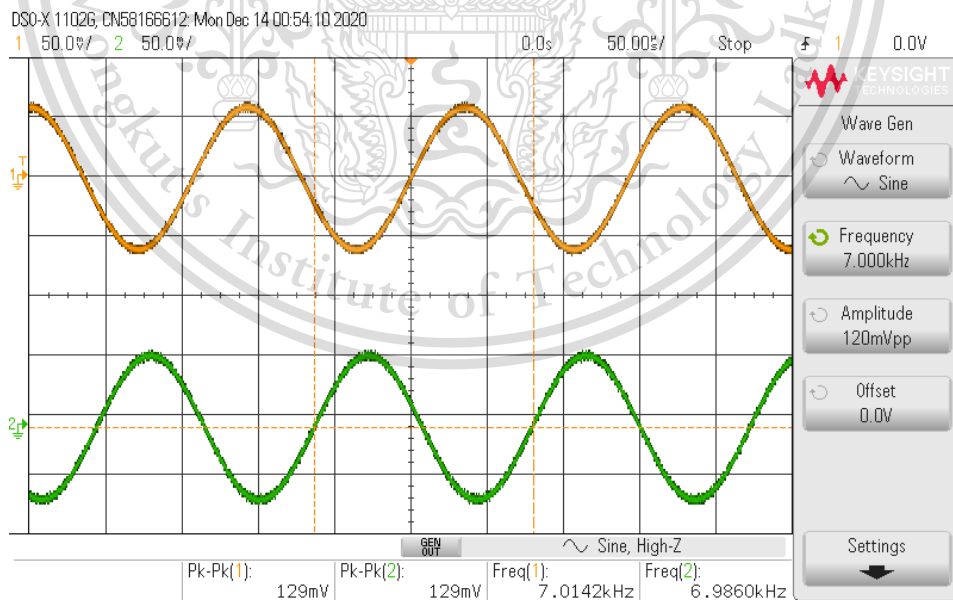
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.58 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 3.25kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter

4.3) ป้อนสัญญาณซายน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.59 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.59 วัดสัญญาณใน time domain ด้วยการป้อนสัญญาณ Sine ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Bandstop Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

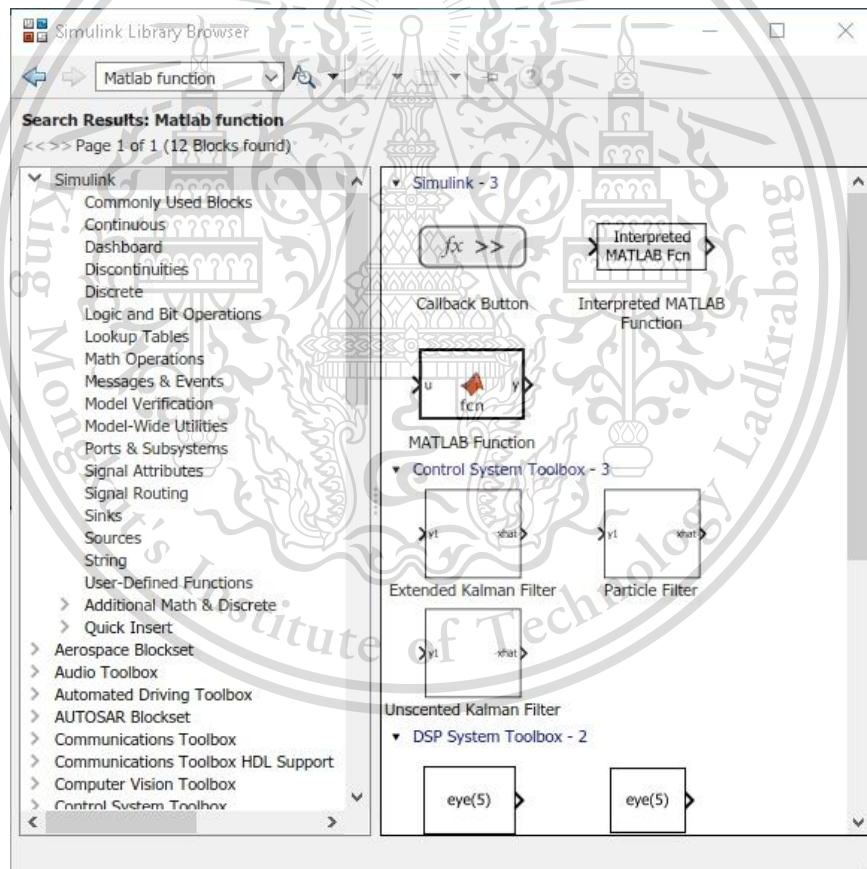
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.1.2.2 การออกแบบ FIR filter ด้วย M-file

เป็นการออกแบบ FIR filter ทั้ง 4 ชนิดด้วยการต่อบล็อกและเขียนโปรแกรมสร้าง M-file ในโปรแกรม Matlab เองดังนี้

##### 1) 2nd IIR Lowpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับการสร้าง 2nd IIR filter ด้วยวิธีต่อบล็อก Simulink ในหัวข้อที่ 4.2.1 เพียงแต่ทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Matlab Function แล้วทำการเลือก Matlab Function ดังรูปที่ 4.60 จากนั้นทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างแทนที่บล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 4.61

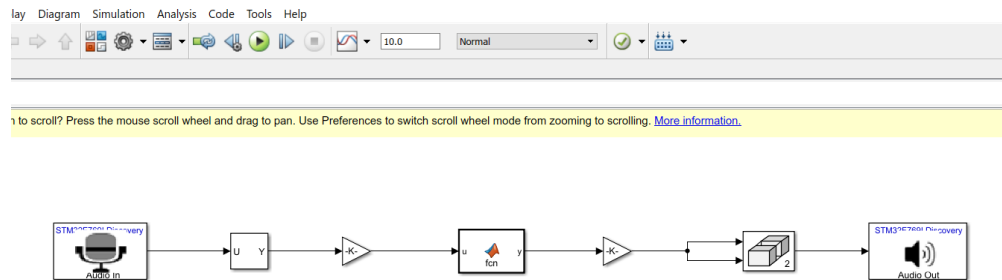


รูปที่ 4.60 บล็อก Matlab Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

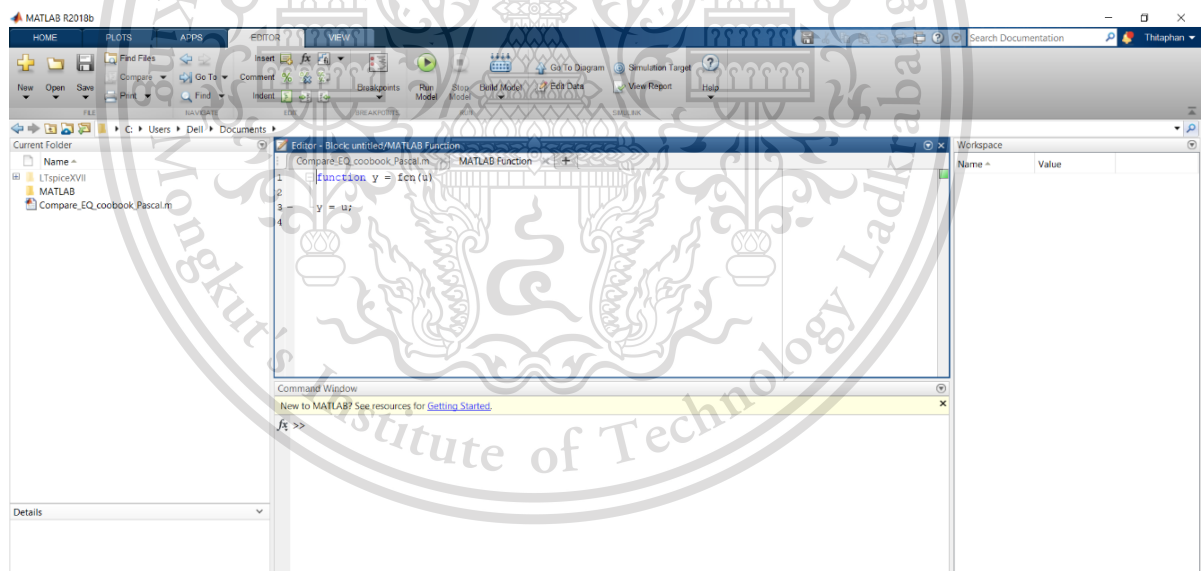
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.61 ลากบล็อก Matlab Function ออกมาวางในหน้าต่างแทนที่บล็อก Discrete Filter

ทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก Matlab Function จะปรากฏพื้นที่หน้าต่างสำหรับเขียนโปรแกรม M-file ดังรูปที่ 4.62 จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้าง 2nd IIR Lowpass filter ดังรูปที่ 4.63 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Lowpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab จากรูปที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.1.1



รูปที่ 4.62 หน้าต่างสำหรับเขียนโปรแกรม M-file

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

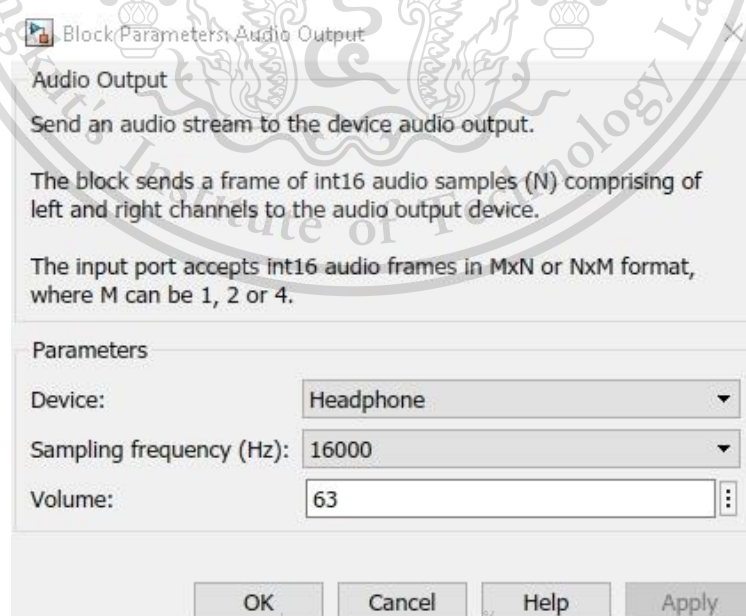
```

Editor - Block: IIR_MFile/MATLAB Function*
LPF_2nd.m x BSF_2nd.m x BPF_2nd.m x HPF_2nd.m x MATLAB Function* x +
1 function [y, xm_out, ym_out] = iir_test(xn, xm_in, ym_in)
2     b = [0.2302 0.4604 0.2302];
3     a = [1.0000 -0.2101 0.1309];
4     y=ones(1024,1,'double');
5     xm = xm_in; %4*1
6     ym = ym_in; %4*1
7     for n=1:1024
8         y(n) = b(1)*xn(n);
9         for nn=1:length(b)-1
10            y(n) = y(n) + b(nn+1)*xm(nn) - a(nn+1)*ym(nn);
11        end
12        for i=length(b)-2:-1:1
13            xm(i+1) = xm(i);
14            ym(i+1) = ym(i);
15        end
16        xm(1) = xn(n);
17        ym(1) = y(n);
18    end
19    xm_out = xm;
20    ym_out = ym;
21 end
22

```

รูปที่ 4.63 โปรแกรมสร้าง 2nd IIR Lowpass filter

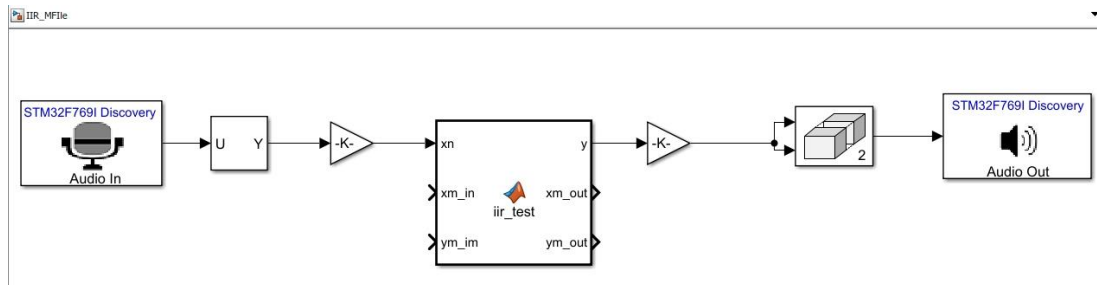
และทำการตั้งค่าบล็อก Audio Output โดยกำหนดให้ Device เป็น Headphone, Sampling frequency เป็น 16,000 และ Volume เป็น 63 ดังรูปที่ 4.64 แล้วทำการคลิก OK จะได้วงจร 2nd IIR Lowpass filter ที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.64 การตั้งค่าบล็อก Audio Output  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

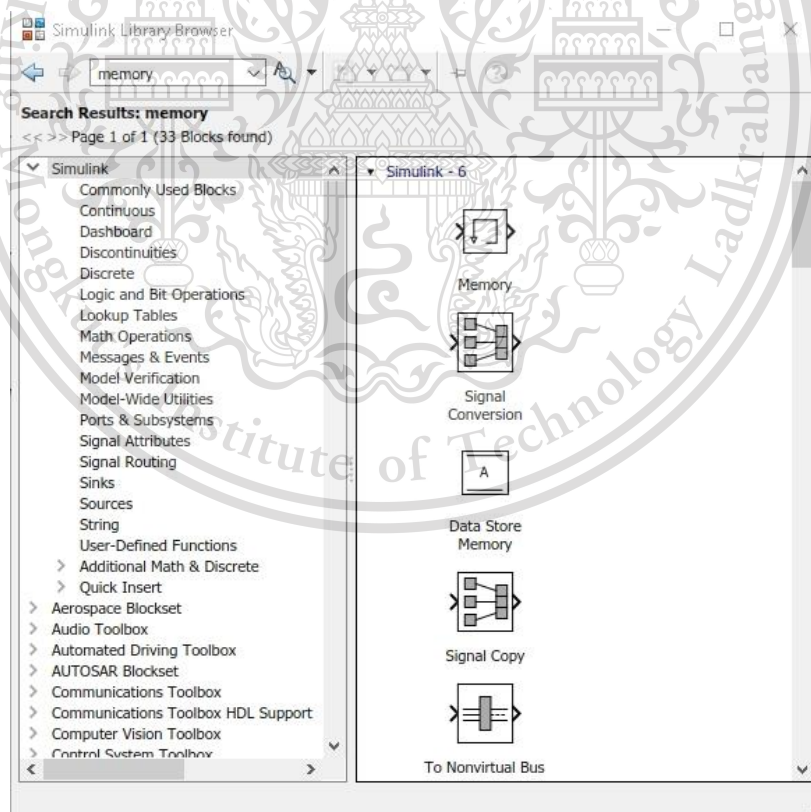
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.65 วงจร 2nd IIR Lowpass filter ที่เปลี่ยนไปหลังจากตั้งค่าบล็อก Audio Output

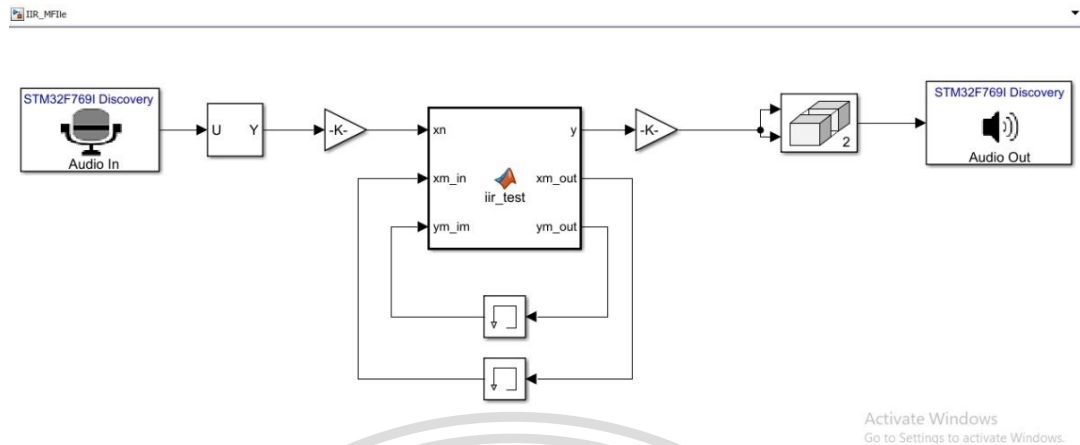
จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า memory แล้วทำการเลือกบล็อก Memory ดังรูปที่ 4.66 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก Memory ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ทั้งหมด 2 บล็อก รวมถึงแล้วทำการ flip บล็อก Memory ทั้งสอง และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matlab Function และ Memory ทั้งสอง ดังรูปที่ 4.67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 4.66 บล็อก Memory  
 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

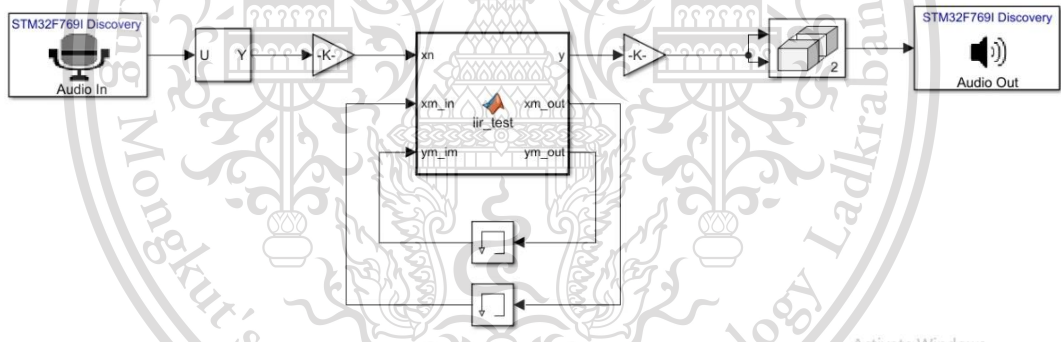
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.67 ลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matlab Function และ Memory ทั้งสอง

รูปที่ 4.68 จะได้อัจฉริยะ Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Lowpass filter ดังรูป



รูปที่ 4.68 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Lowpass filter

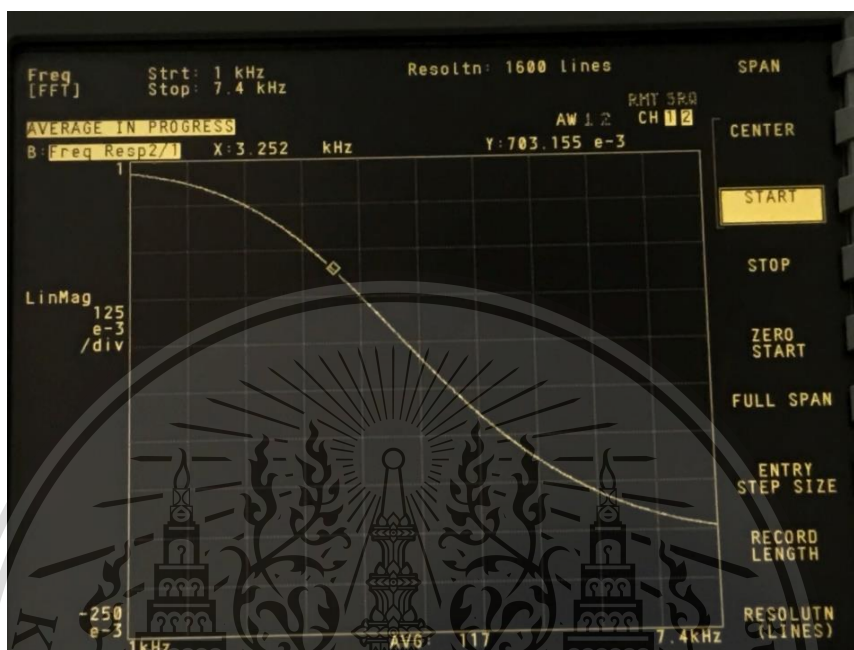
เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR lowpass filter ที่ออกแบบด้วย Poles-zeroes placement โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 4.68 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer วัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.69 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น มิใช่ผู้เขียนได้เขียนขึ้นเพื่อการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

edge frequency 3.25 kHz มีค่าประมาณ 0.703 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 4.69 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Lowpass Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function

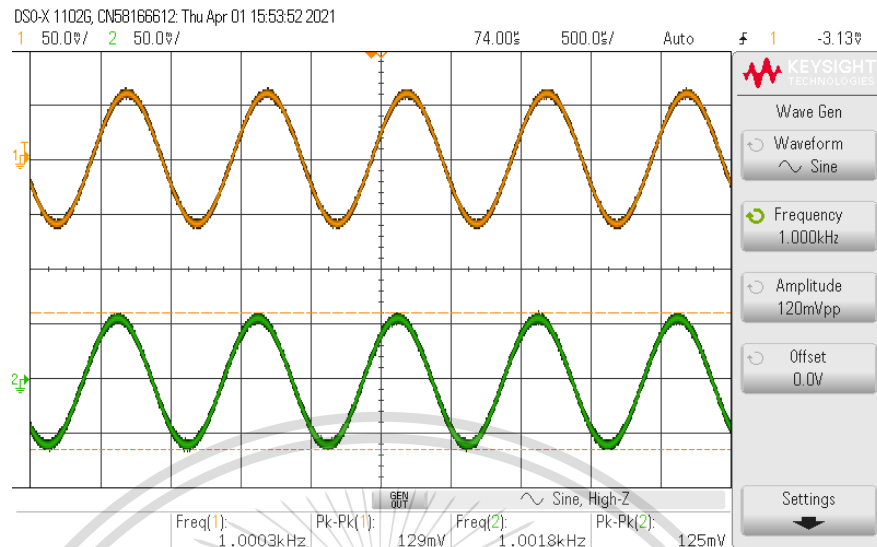
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

1.1) ป้อนสัญญาณชาน์ความถี่ 500 Hz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.70 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

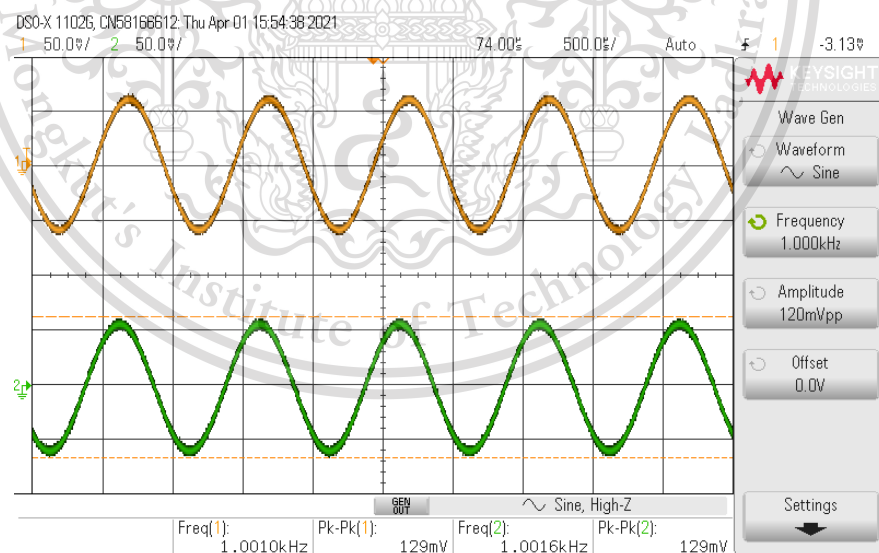
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.70 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 500 Hz ของ 2nd IIR Lowpass filter

1.2) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.71 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



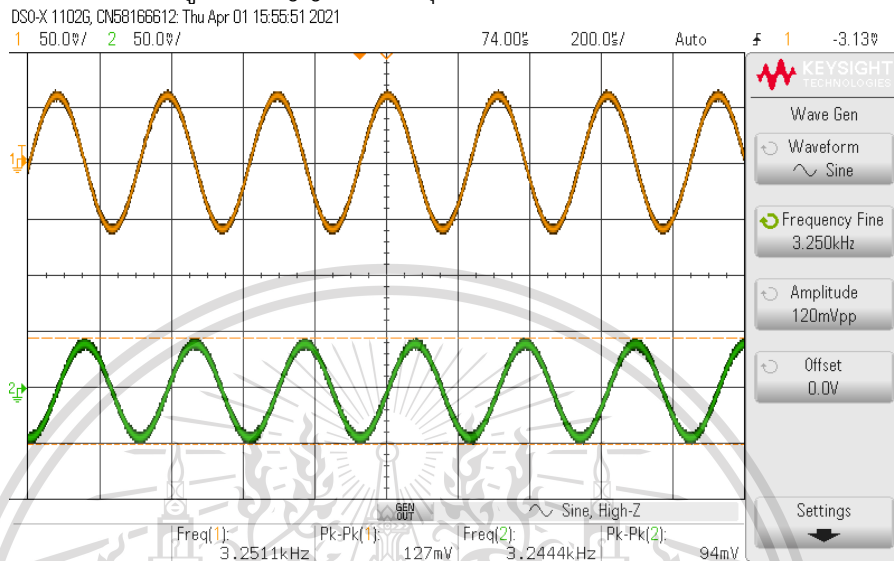
รูปที่ 4.71 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Lowpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

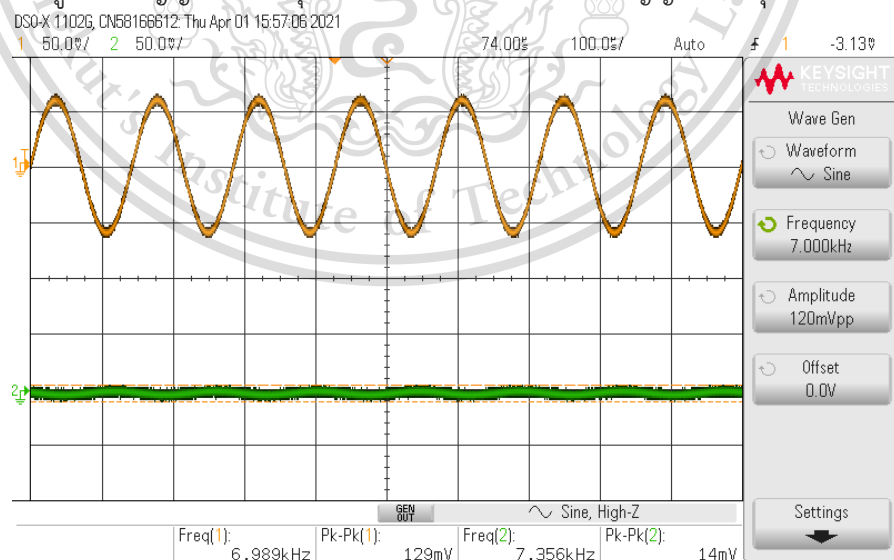
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.72 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.72 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 3.25 kHz ของ 2nd IIR Lowpass filter

1.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.73 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.73 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Lowpass filter

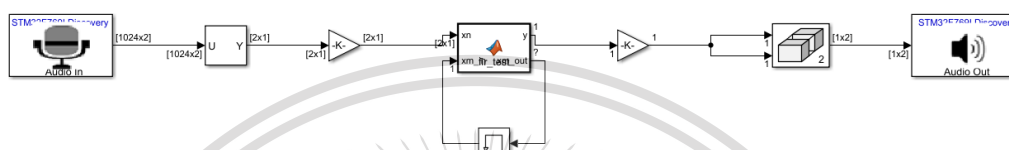
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) 2nd IIR Highpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ 2nd IIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในบล็อก Matlab Function เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Highpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 4.6 ในหัวข้อที่ 4.1.2 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Lowpass filter ดังรูปที่ 4.74



รูปที่ 4.74 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Highpass filter

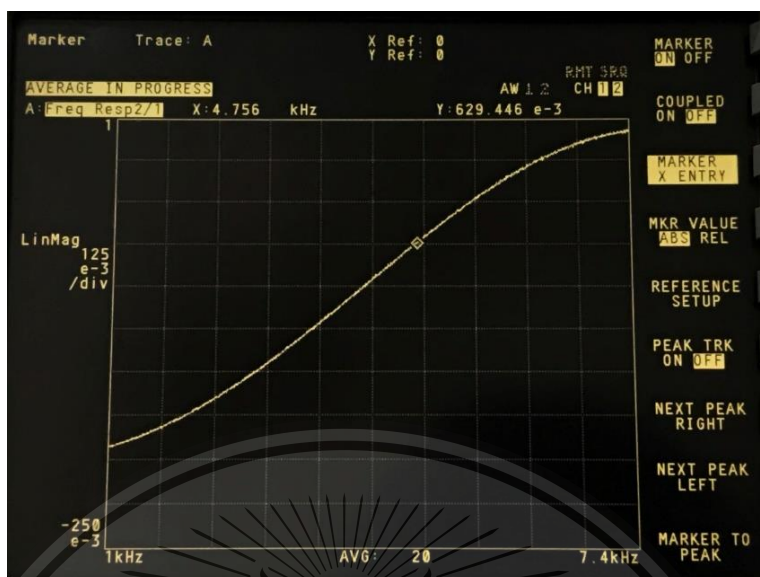
เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR highpass filter ที่ออกแบบด้วย Poles-zeroes placement โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 4.74 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.75 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 4.75 kHz มีค่าประมาณ 0.629 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

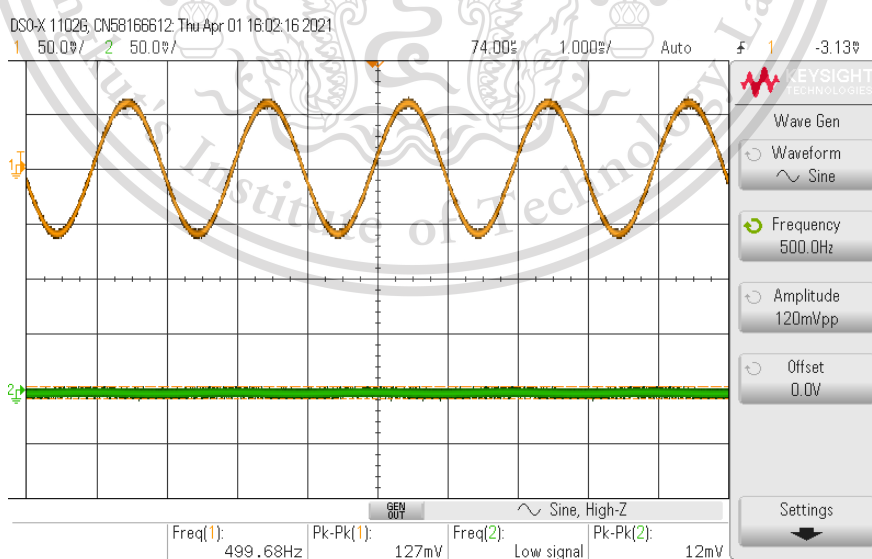
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.75 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Highpass Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

2.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 500 Hz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.76 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



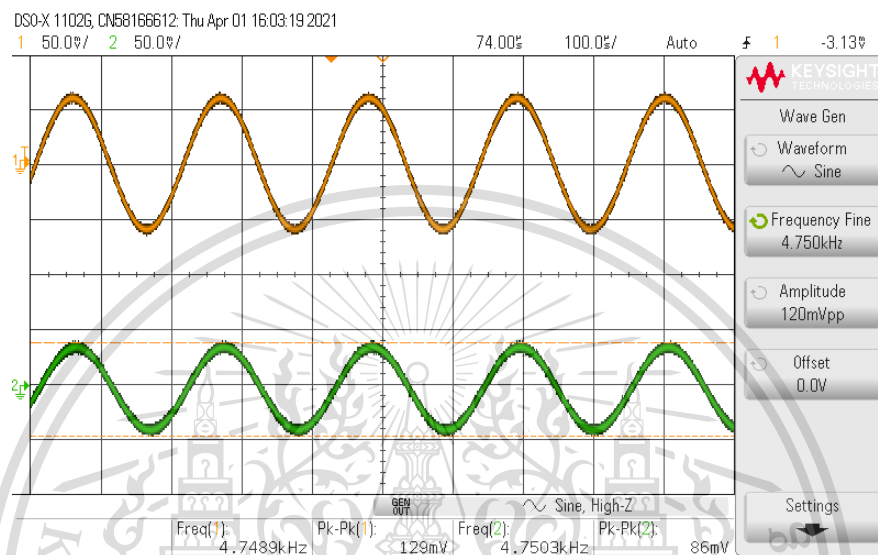
รูปที่ 4.76 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ 500 Hz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของ 2nd IIR Highpass filter

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 4.75 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.77 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต



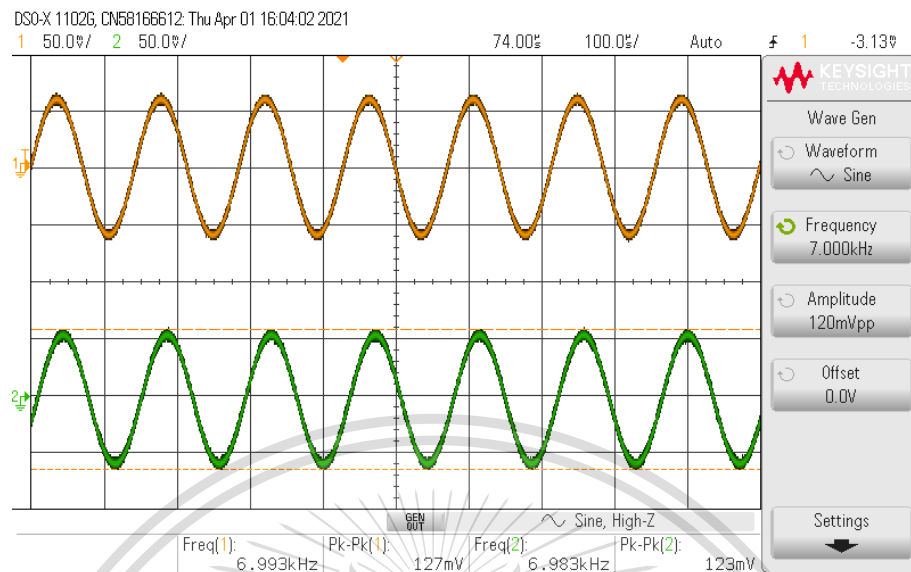
รูปที่ 4.77 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 4.75 kHz ของ 2nd IIR Highpass filter

2.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.78 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

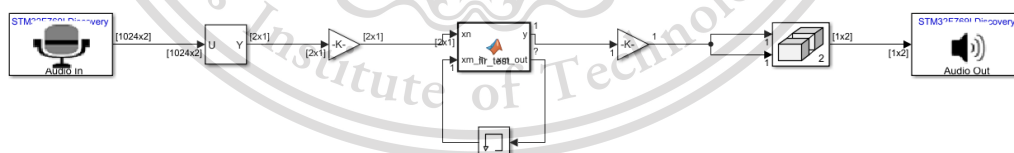
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.78 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Highpass filter

### 3) 2nd IIR Bandpass filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ 2nd IIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในบล็อก Matlab Function เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Bandpass filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 4.11 ในหัวข้อที่ 4.1.3 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Bandpass filter ดังรูปที่ 4.79



รูปที่ 4.79 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Bandpass filter

เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR Bandpass filter ที่ออกแบบด้วย Poles-zeroes placement โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 4.79 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถ

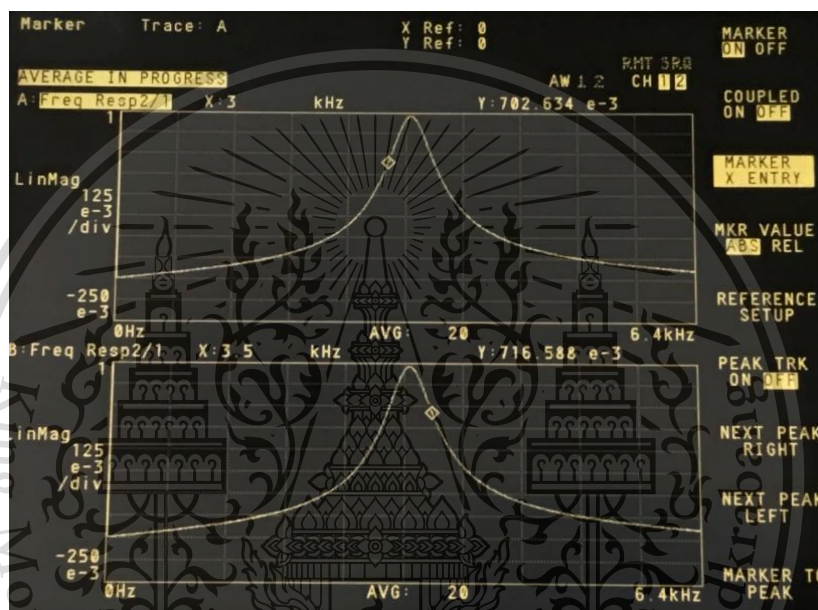
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิลเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.80 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 3.5 kHz และ 5 kHz มีค่าประมาณ 0.703 และ 0.717 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้



รูปที่ 4.80 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR Bandpass Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function

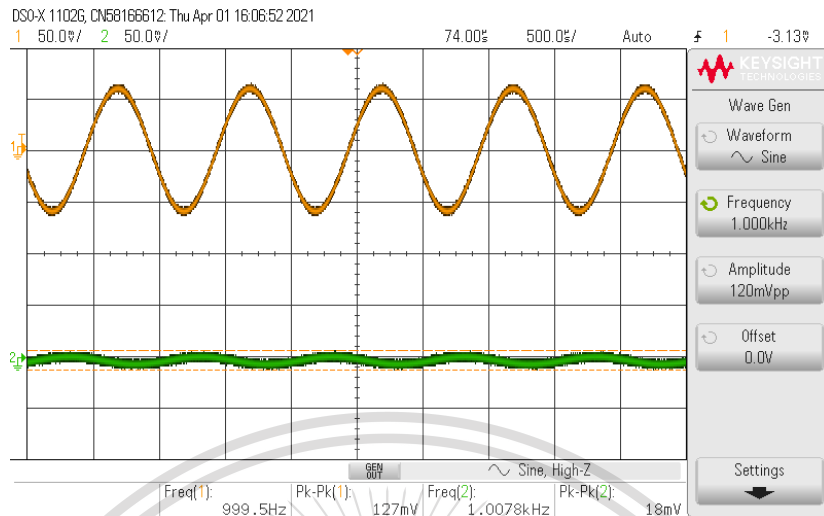
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

3.1) ป้อนสัญญาณความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.81 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

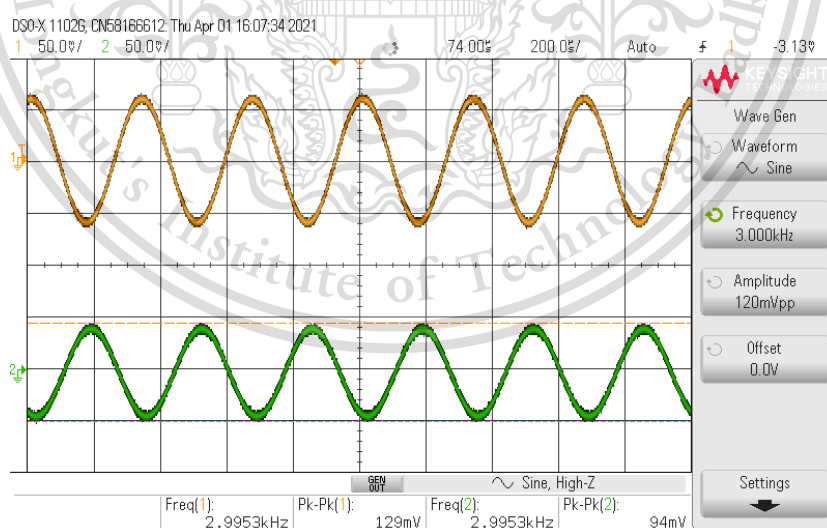
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.81 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandpass filter

3.2) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.82 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตจะน้อยกว่าสัญญาณอินพุต



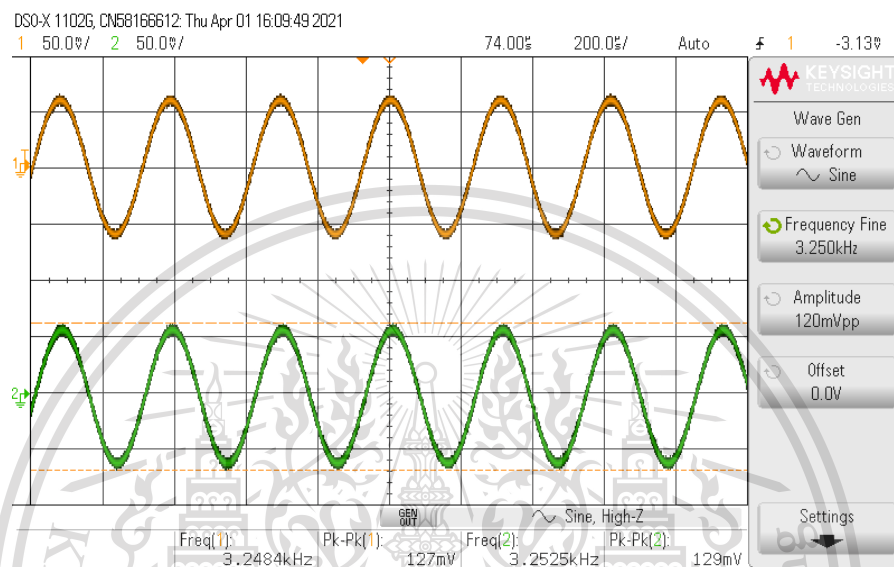
รูปที่ 4.82 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 3 kHz ของ 2nd IIR Bandpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.83 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต



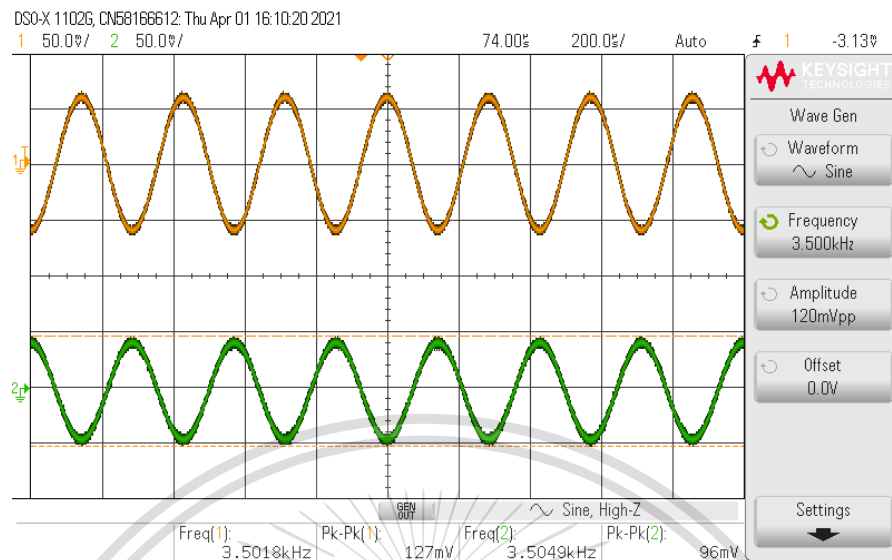
รูปที่ 4.83 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 3.25 kHz ของ 2nd IIR Bandpass filter

3.4) ป้อนสัญญาณไซน์ความถี่ 3.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.84 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

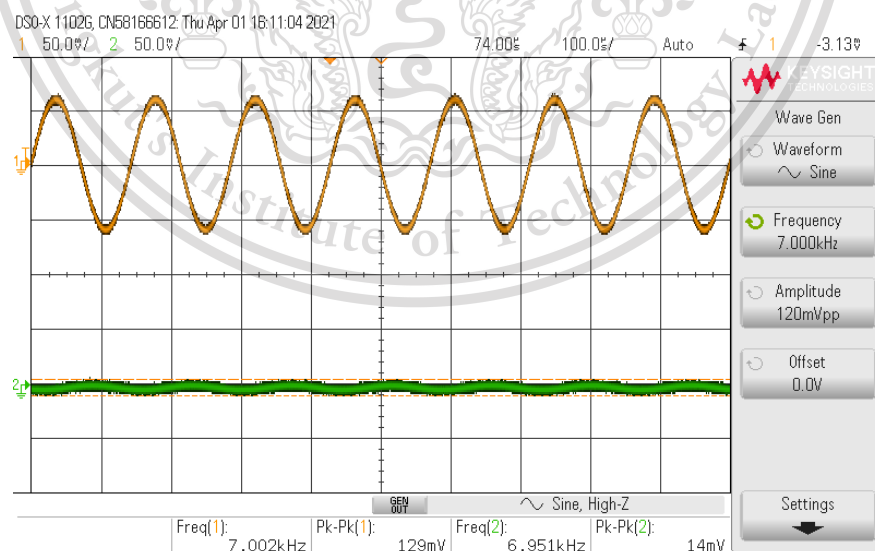
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.84 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 3.5 kHz ของ 2nd IIR Bandpass filter

3.5) ป้อนสัญญาณขาอินพุตความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.85 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.85 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่มีความถี่ 7 kHz

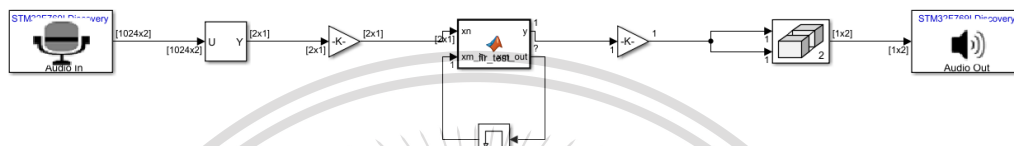
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของ 2nd IIR Bandpass filter อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4) 2nd IIR Bandstop filter

ทำการเลือกบล็อก Simulink Library โดยดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับ 2nd IIR Lowpass filter ในหัวข้อ 1) เพียงแต่ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในบล็อก Matlab Function เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ 2nd IIR Bandstop filter ที่ได้จากการเขียนโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 4.16 ในหัวข้อที่ 4.1.4 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Bandpass filter ดังรูปที่ 4.86



รูปที่ 4.86 วงจร Simulink แบบ M-file ของ 2nd IIR Bandstop filter

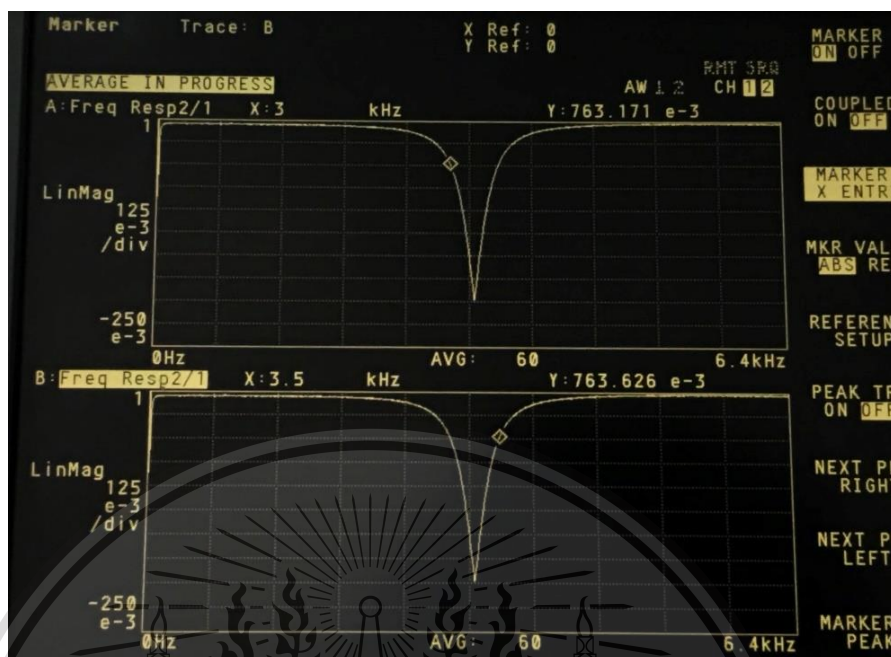
เมื่อทำการทดลอง build 2nd IIR Bandstop filter ที่ออกแบบด้วย Poles-zeroes placement โดยการต่อ block การทำงานบน Simulink ดังรูปที่ 4.86 แล้วทำการเพิ่มค่า filter length เพื่อดูขีดจำกัดที่บอร์ดสามารถรับได้ ผลที่ได้คือโครงสร้าง Direct Form บอร์ดสามารถรองรับค่า filter length ได้ 93 ส่วนโครงสร้าง Linear-phase structure สามารถรองรับค่า filter length ได้ 103 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ในเล่ม Experimental hand book นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ Linear-phase structure ในการ implement ฟิเตอร์เพียงรูปแบบเดียว

จากนั้นทำการใช้เครื่อง Dynamic Signal Analyzer ในการวัดผล Frequency Response ใน frequency domain ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.87 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง passband edge frequency 1.5 kHz และ 5.5 kHz มีค่าประมาณ 0.763 และ 0.764 ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบคุณลักษณะไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.87 ผลการวัด Amplitude response ของ 2nd IIR bandstop Filter ที่ออกแบบด้วย Pole-zero placement สร้างด้วยบล็อก MATLAB M-File Function

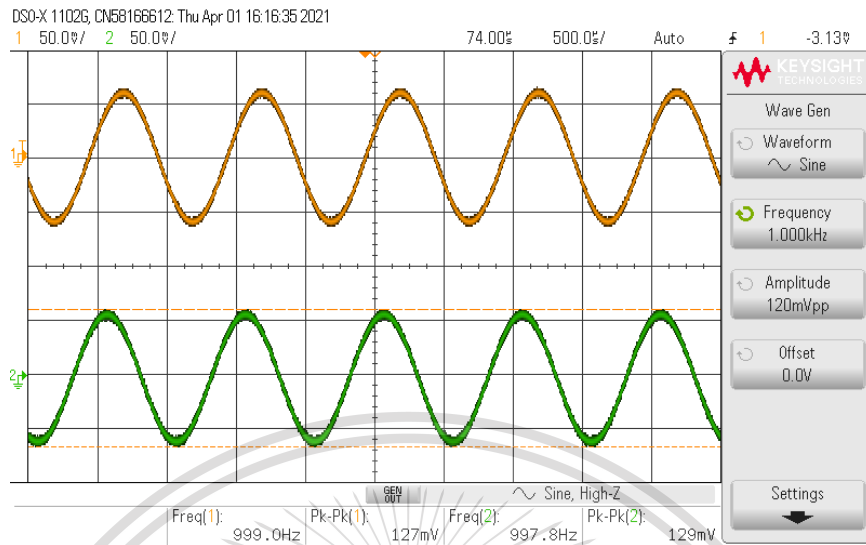
จากนั้นทำการใช้เครื่อง Digital Oscilloscope ในการวัดผลสัญญาณใน time domain ทำการป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ต่างๆเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองดังนี้

4.1) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 1 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.89 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

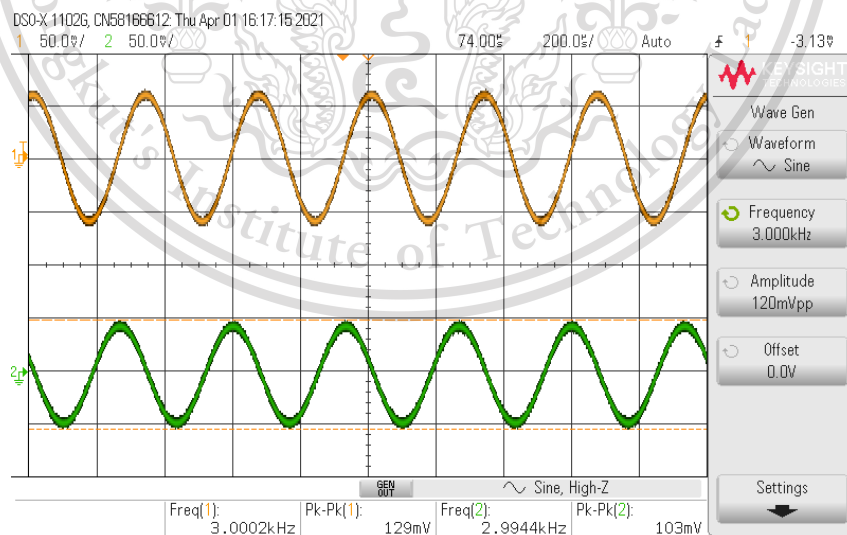
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.89 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 1 kHz ของ 2nd IIR Bandstop filter

4.2) ป้อนสัญญาณขาเข้าความถี่ 3 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.90 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต



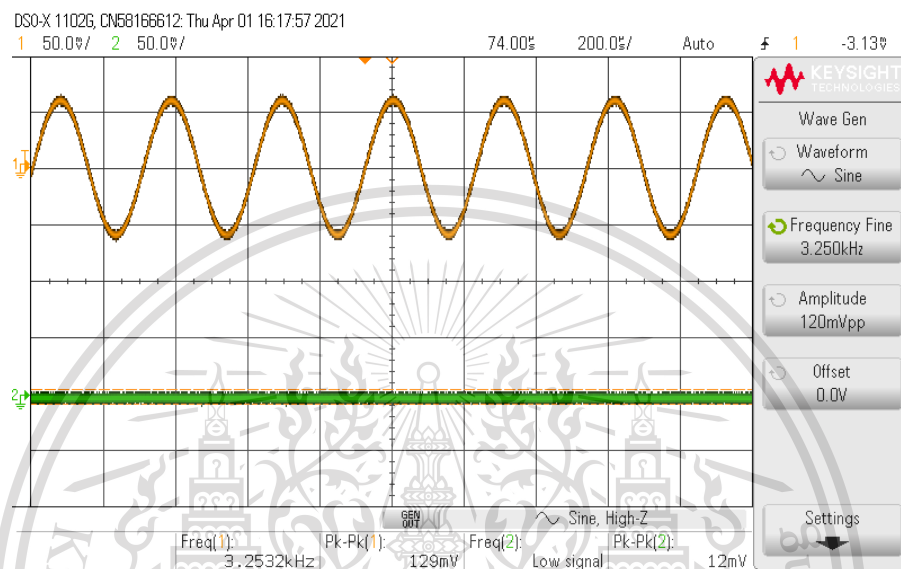
รูปที่ 4.90 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีความถี่ 3 kHz ของ 2nd IIR Bandstop filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3) ป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 3.25 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.91 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต



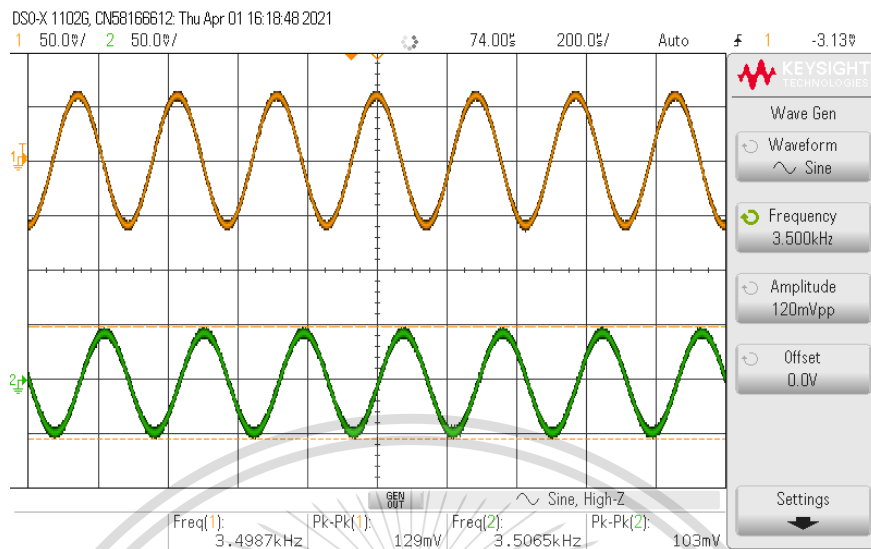
รูปที่ 4.91 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 3.25 kHz ของ 2nd IIR Bandstop filter

4.4) ป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 3.5 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.92 โดยค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ส่วนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

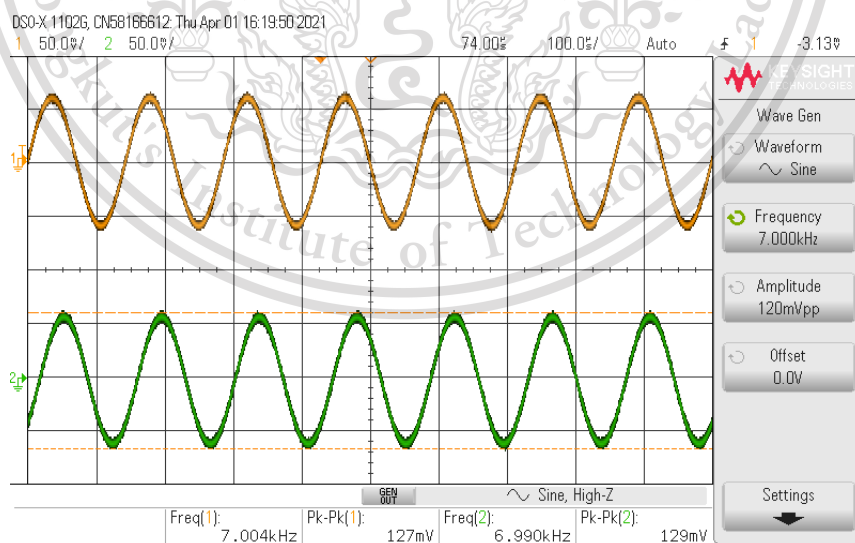
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.92 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 3.5 kHz ของ 2nd IIR Bandstop filter

4.5) ป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 7 kHz แอมพลิจูด 120 mVpp ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.93 โดยค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.93 วัดสัญญาณใน time domain เมื่อป้อนสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่ 7 kHz ของ 2nd IIR Bandstop filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีที่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### Applications of digital filters

#### 5.1 การประยุกต์ใช้งาน FIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี windowing

ปริณูตานิพนธ์นี้ทำการประยุกต์ใช้งานโดยการนำ FIR filter มาสร้างเป็น Graphic Equalizer เป็น Equalizer ที่สามารถทำการปรับเพิ่มหรือลดค่าเกณฑ์ของสัญญาณได้ เมื่อทำการสร้างจาก FIR filter จะทำให้เฟสของสัญญาณมีความเป็นเชิงเส้น แต่มีข้อจำกัดคือ ตัว Equalizer จะกำหนดค่าความถี่ที่สามารถใช้งานได้มาแล้ว ไม่สามารถเลือกปรับค่าเกณฑ์ที่ค่าความถี่จำเพาะได้ FIR filter ที่นำมาใช้งานจะใช้ Kaiser window function ในการออกแบบ ซึ่งจากผลการทดสอบการออกแบบ FIR filter โดยใช้ Kaiser window function (จากหัวข้อที่ 3.5 เรื่อง ผลการทดสอบข้อจำกัดการรองรับค่า filter length ที่บอร์ด STM32F769I สามารถรองรับได้) ค่า filter length, N ที่บอร์ด STM32F769I สามารถรองรับและเพื่อทำการประมวลผลได้สูงสุดอยู่ที่ 103 ดังนั้นปริณูตานิพนธ์นี้จึงทำการกำหนดช่วงความถี่เป็น 3 ช่วง ออกแบบเป็น 3-band Graphic Equalizer ซึ่งการทำงานของ Graphic Equalizer จะเป็นการทำงานพร้อมกันทุก band ทำให้ค่า filter length ที่แต่ละ band สามารถใช้ได้คือ  $N = 33$  โดยมีคุณลักษณะดังนี้

1) ช่วงความถี่ต่ำใช้การออกแบบ Lowpass filter เป็นฟิลเตอร์สำหรับเพิ่มหรือลดค่าเกณฑ์ในช่วงนี้

โดยกำหนดค่า passband edge frequency (-6 dB) อยู่ที่ 2.67 kHz

sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation (A) 60 dB

2) ช่วงความถี่กลางใช้การออกแบบ Bandpass filter เป็นฟิลเตอร์สำหรับเพิ่มหรือลดค่าเกณฑ์ในช่วงนี้

โดยกำหนดค่า passband edge frequency (-6 dB) อยู่ที่ 2.67 kHz และ 5.33 kHz

sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation (A) 60 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) ช่วงความถี่สูงใช้การออกแบบ Highpass filter เป็นฟิลเตอร์สำหรับเพิ่มหรือลดค่าเกนในช่วงนี้

โดยกำหนดค่า passband edge frequency (-6 dB) อยู่ที่ 5.33 kHz

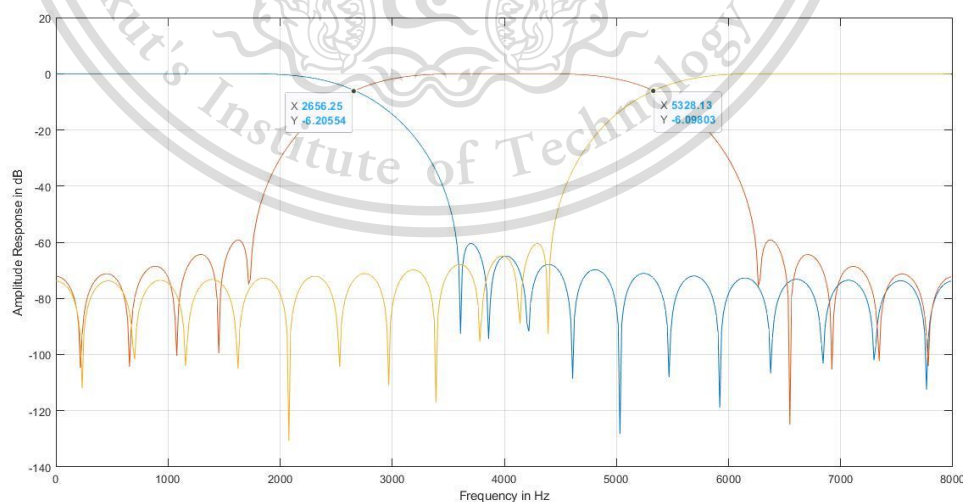
sampling frequency ( $F_s$ ) 16 kHz

Passband ripple ( $\delta_p$ ) 0.1 dB

Stopband attenuation (A) 60 dB

จากคุณลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า  $\beta = 5.6533$  และ เมื่อทำการคำนวณหาค่า Transition width จะได้ค่า Transition width เท่ากับ 1.75 kHz และจาก amplitude response ของฟิลเตอร์แต่ละแบนด์ที่แสดงดังรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าฟิลเตอร์ทั้ง 3 แบนด์มีคุณลักษณะตรงตามที่กำหนดไว้ทั้งค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่ง passband edge frequency ซึ่งมีค่าเท่ากับ -6 dB และ Stopband attenuation สูงสุดอยู่ที่ -60 dB โดยที่จากรูปที่ 5.1 กราฟทางด้านซ้ายมือคือ Lowpass Filter กราฟตรงกลางคือ Bandpass Filter และกราฟด้านขวามือคือ Highpass Filter

เมื่อทำการพล็อต amplitude response รวมซึ่งจะเป็น amplitude response จริงที่เกิดขึ้นขณะที่แบนด์ทั้ง 3 แบนด์ของ 3-band Graphic Equalizer ทำงานพร้อมกัน จากรูปที่ 5.2 เป็น amplitude response รวมที่ค่าเกนทุกแบนด์มีค่าเท่ากับ 0 dB จะได้ผลการตอบสนองรวมที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง เนื่องจากที่ passband edge frequency เท่ากับ -6 dB ที่ 2.66 kHz และ 5.33 kHz ของฟิลเตอร์ที่อยู่ติดกันจะทำการเสริมกัน ทำให้เกนรวมมีค่าประมาณ 0 dB



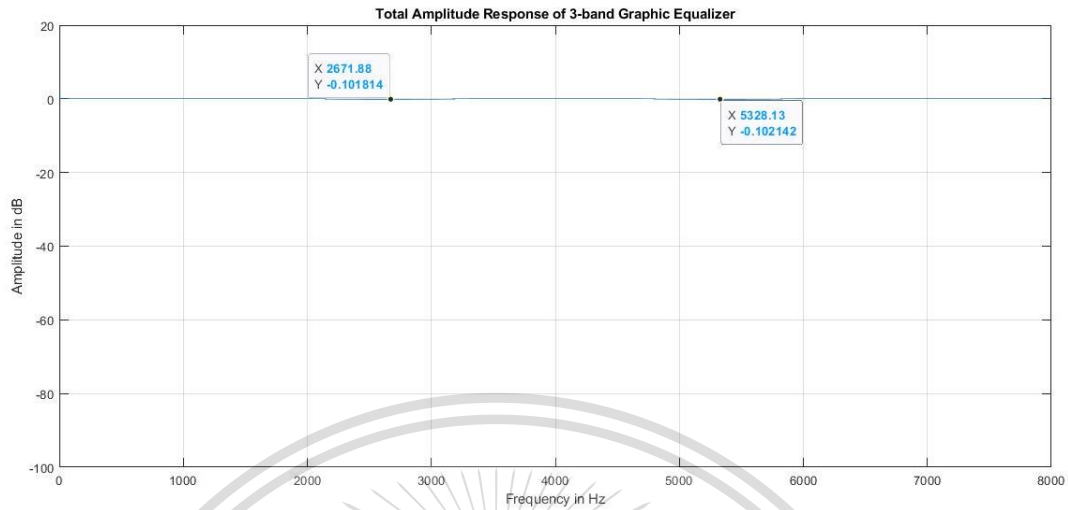
รูปที่ 5.1 Amplitude response ของฟิลเตอร์แต่ละแบนด์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
3-band Graphic Equalizer ในหน่วย dB

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

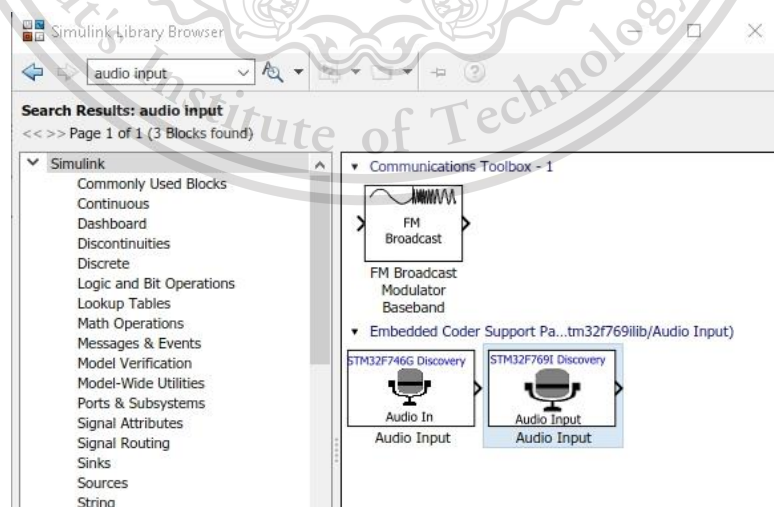


รูปที่ 5.2 Amplitude response รวมของ 3-band Graphic Equalizer ที่ค่าเกณฑ์ของทุกแบนด์มีค่าเป็น 0 dB

## 5.2 การออกแบบ Graphic Equalizer

โดยในส่วนของการขั้นตอนการสร้าง Graphic Equalizer ที่สร้างจากการประยุกต์ใช้งาน FIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี windowing สามารถทำได้ด้วยการต่อบล็อก Simulink ใน Matlab ดังนี้

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Audio Input แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Input ดังรูปที่ 5.3 จากนั้นให้ทำการลาก บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.4

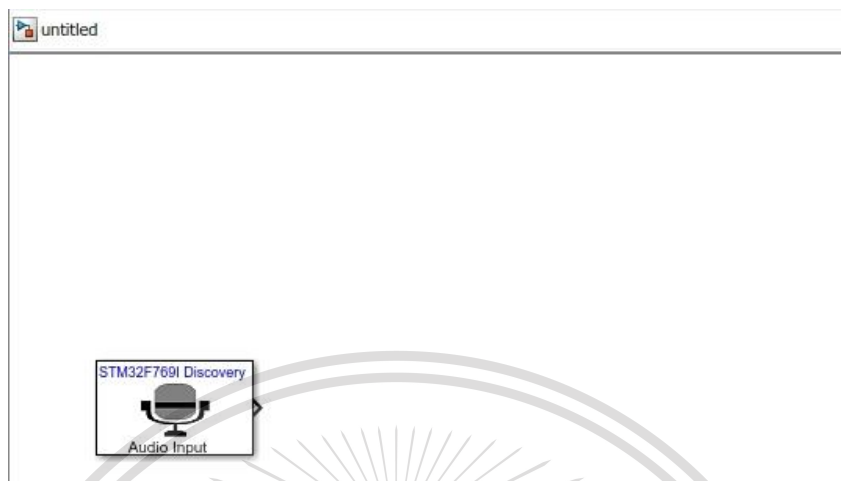


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 5.3 บล็อก Audio Input

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

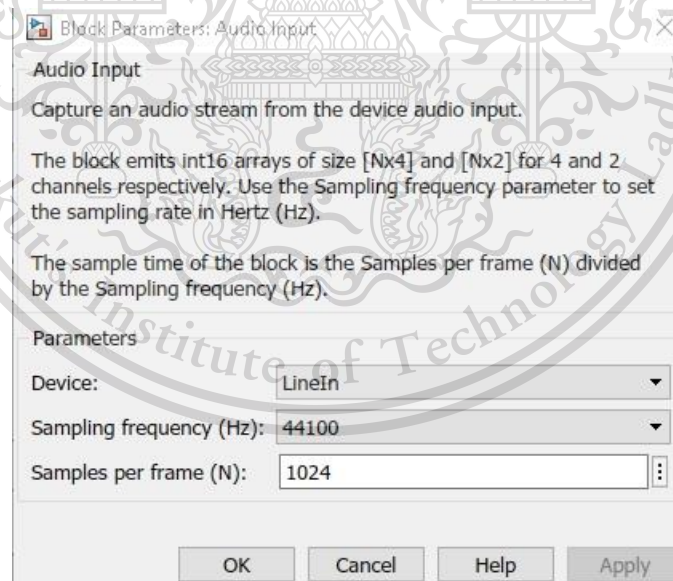
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.4 ลากบล็อก Audio Input ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Input โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 44,100 Hz, Device เป็น LineIn และ Samples per frame เป็น 1,024 ดังรูปที่ 5.5



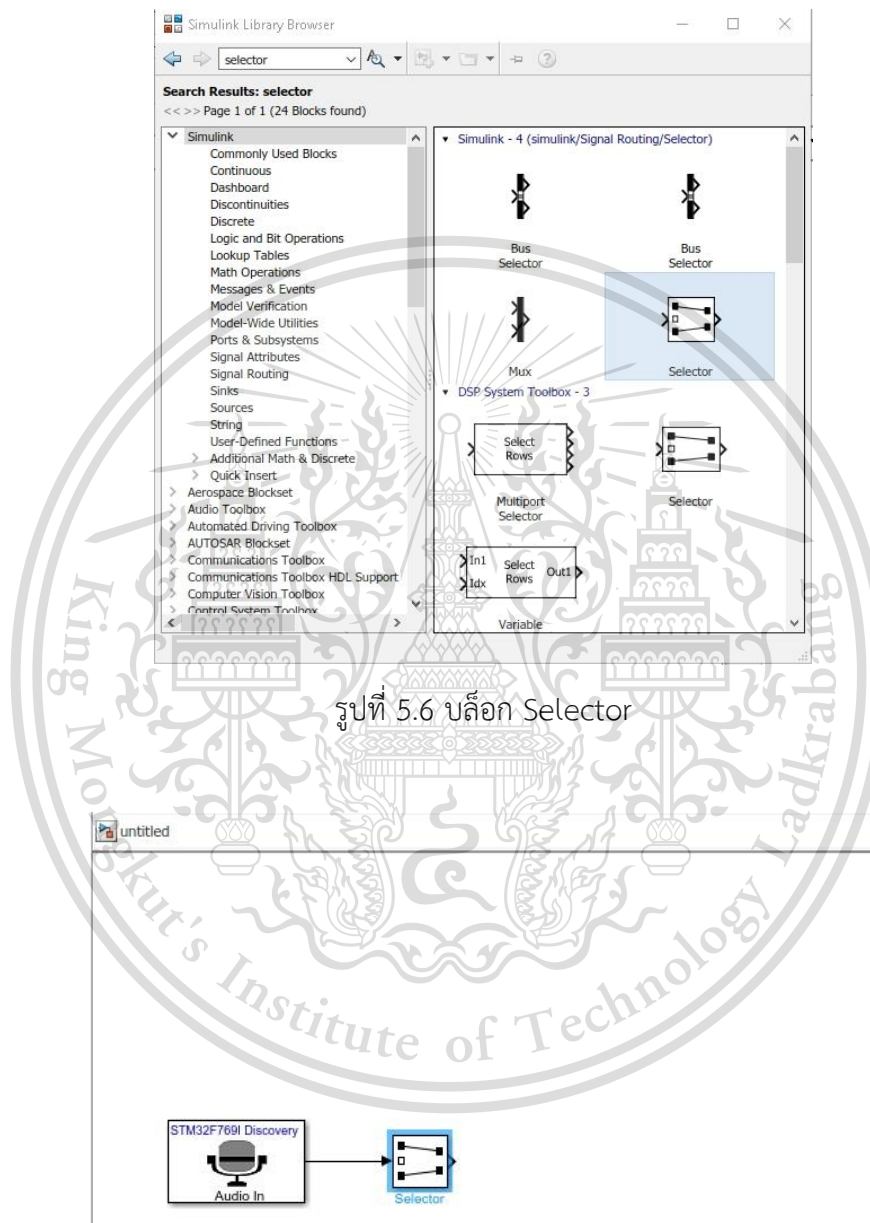
รูปที่ 5.5 การตั้งค่าบล็อก Audio Input

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่  
ค้นหาว่า Selector แล้วทำการเลือกบล็อก Selector ดังรูปที่ 5.6 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 บล็อก Selector

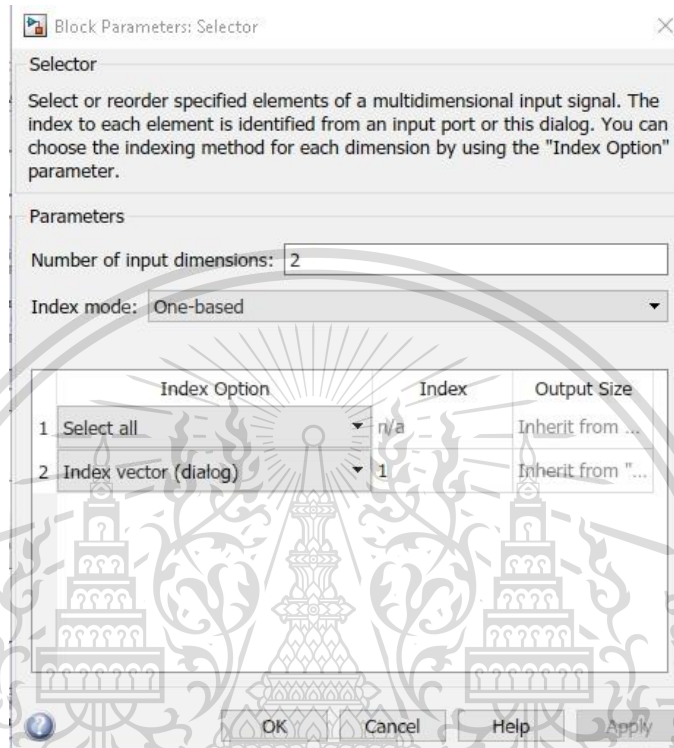
รูปที่ 5.7 ลากบล็อก Selector ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Selector โดยกำหนดให้ Number of input dimensions เป็น 2 และ Index mode เป็น One-based ดังรูปที่ 5.8 แล้วทำการกด OK จะได้บล็อก Selector ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 การตั้งค่าบล็อก Selector

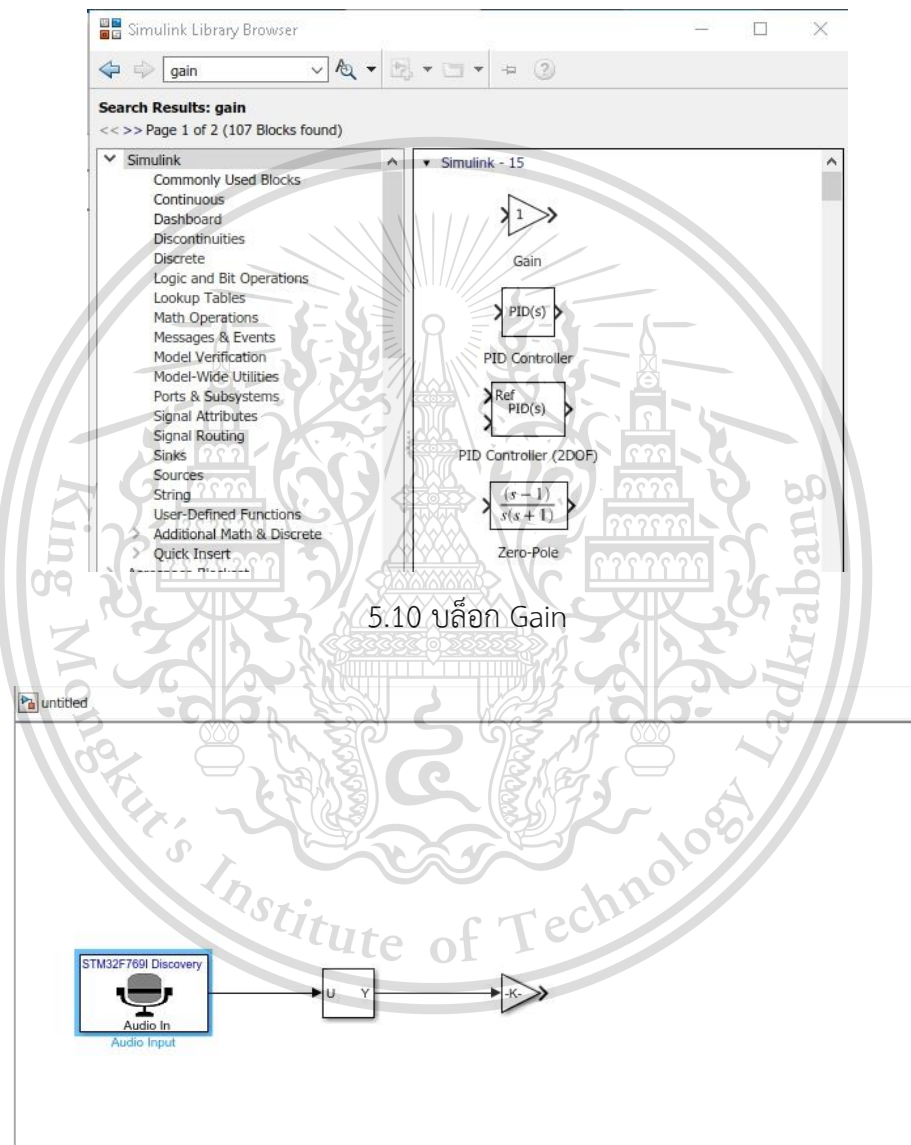


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5.9 บล็อก Selector ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (1)  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องข้อค้นหาคำว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 5.10 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain ดังรูปที่ 5.11



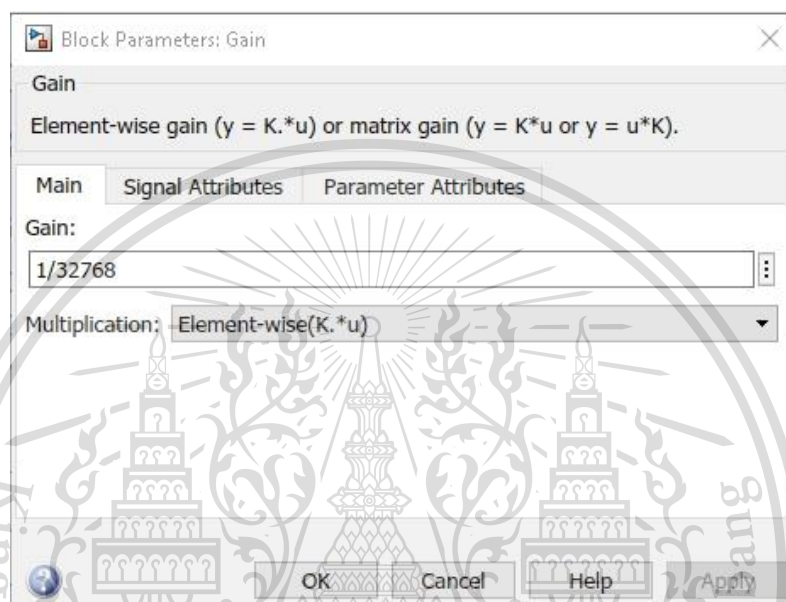
รูปที่ 5.11 ลากบล็อก Gain ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

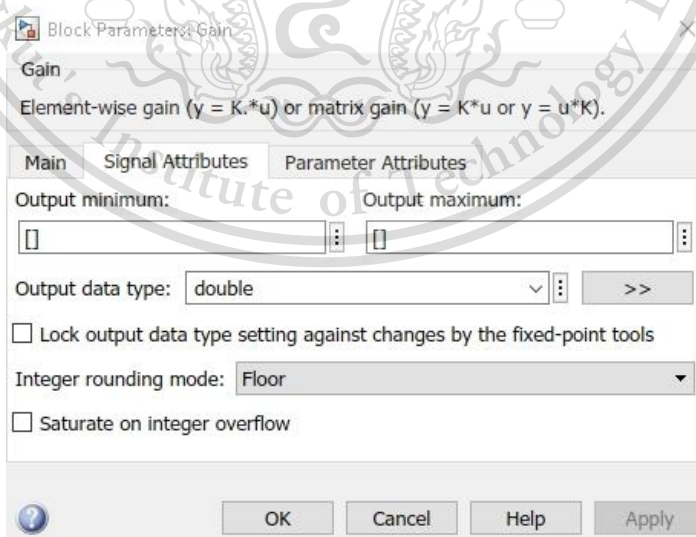
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Gain โดยกำหนดให้ค่า Gain เป็น 1/32768, Multiplication เป็น Element-wise( $K \cdot u$ ), Output minimum เป็น [], Output maximum เป็น [], Output data type เป็น double และ Integer rounding mode เป็น Floor ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ แล้วทำการกด OK



รูปที่ 5.12 การตั้งค่าบล็อก Gain



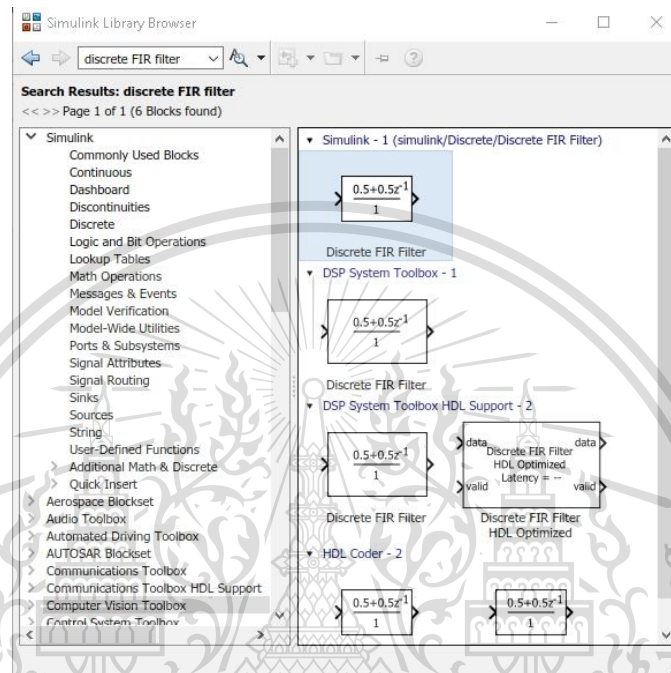
รูปที่ 5.13 การตั้งค่าบล็อก Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

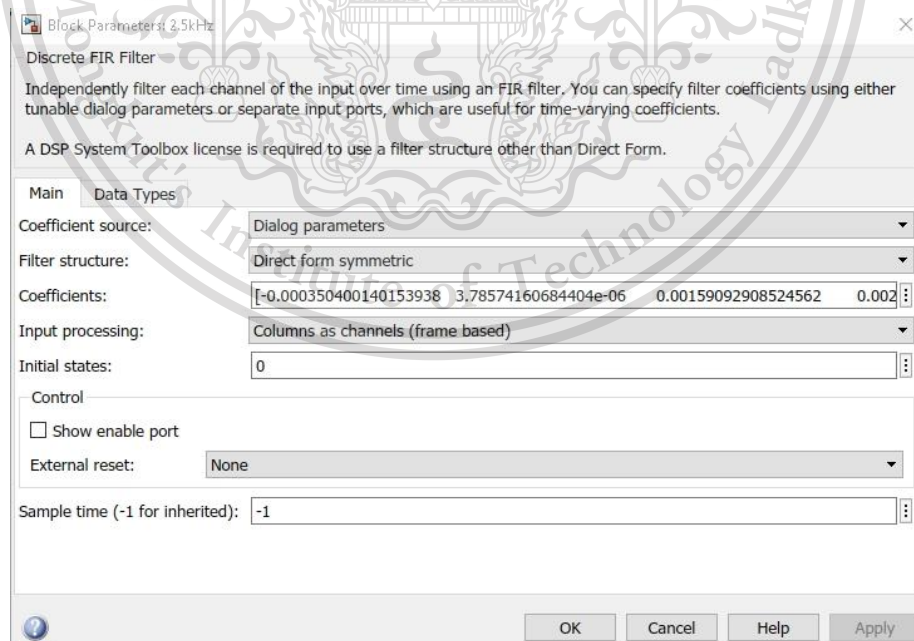
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องของ ค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete FIR Filter ดังรูปที่ 5.14 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink แล้วทำการตั้งค่าบล็อกดังรูปที่ 5.15 จากนั้นทำการกด OK จะได้บล็อก Discrete FIR Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.16



5.14 บล็อก Discrete FIR Filter (1)

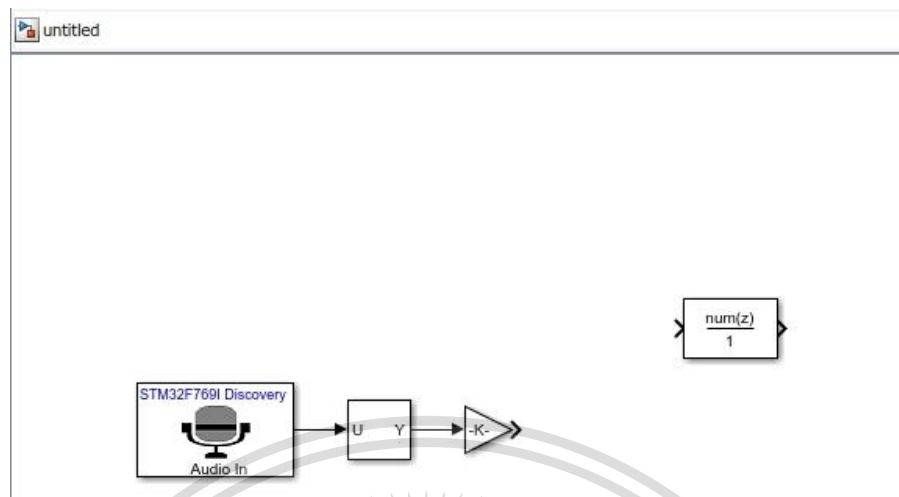


รูปที่ 5.15 ตั้งค่าบล็อก Discrete FIR Filter (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

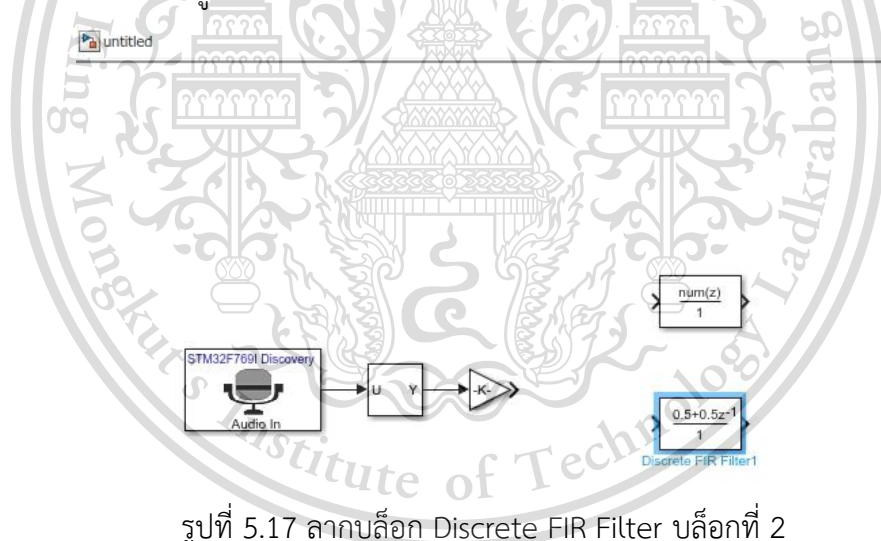
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.16 บล็อก Discrete FIR Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (1)

ทำการลากบล็อก Discrete FIR Filter บล็อกที่ 2 ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง ดังรูปที่ 5.17 แล้วตั้งค่าบล็อกดังรูปที่ 5.18

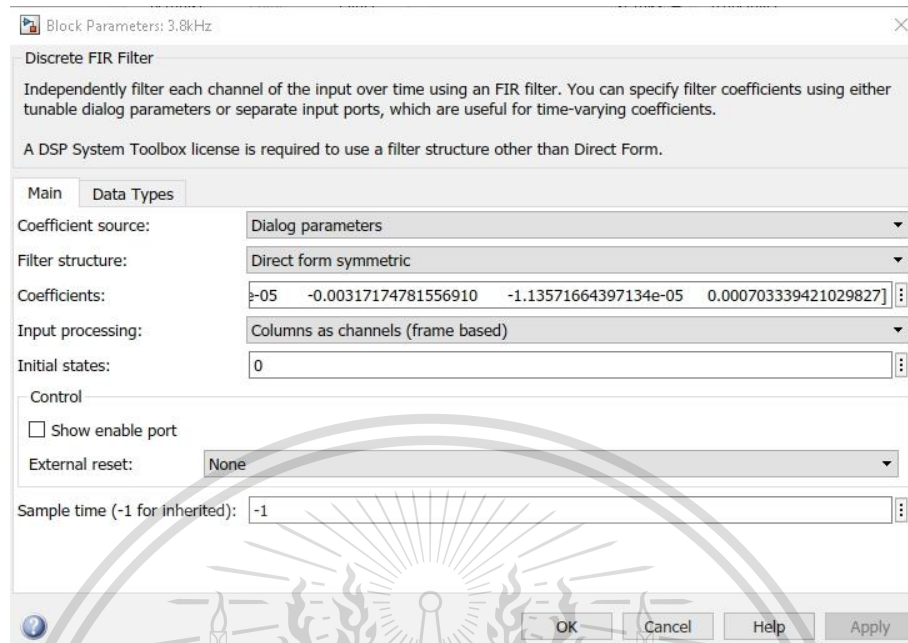


รูปที่ 5.17 ลากบล็อก Discrete FIR Filter บล็อกที่ 2  
ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

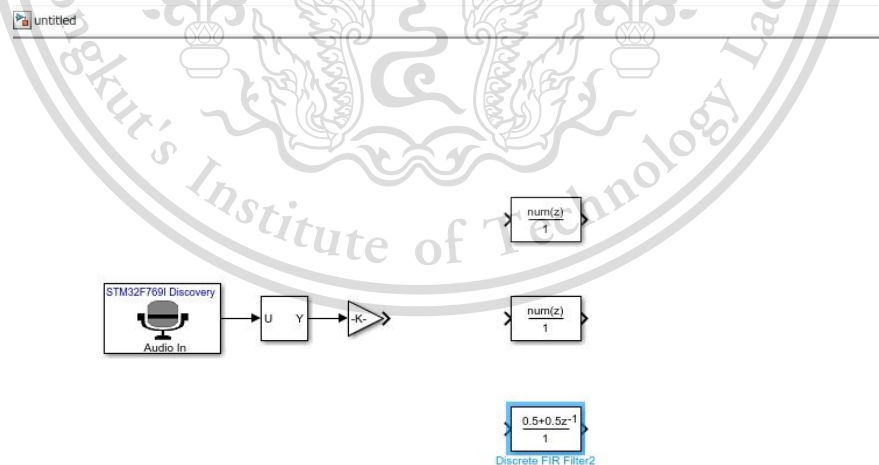
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.18 ตั้งค่าบล็อก Discrete FIR Filter ตัวที่ 2

ทำการลากบล็อก Discrete FIR Filter บล็อกที่ 3 ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง ดังรูปที่ 5.19 แล้วตั้งค่าบล็อกดังรูปที่ 5.20

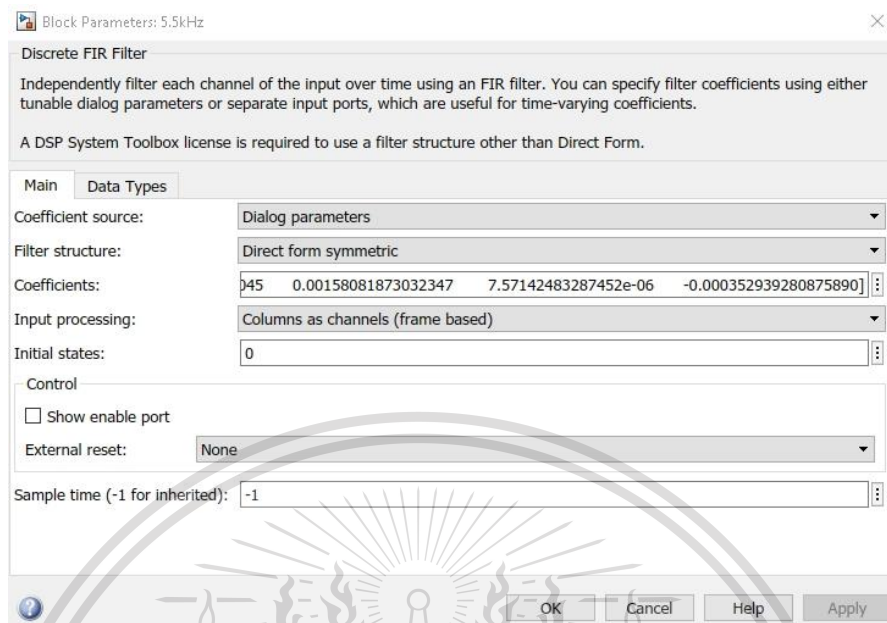


รูปที่ 5.19 ลากบล็อก Discrete FIR Filter บล็อกที่ 3  
ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

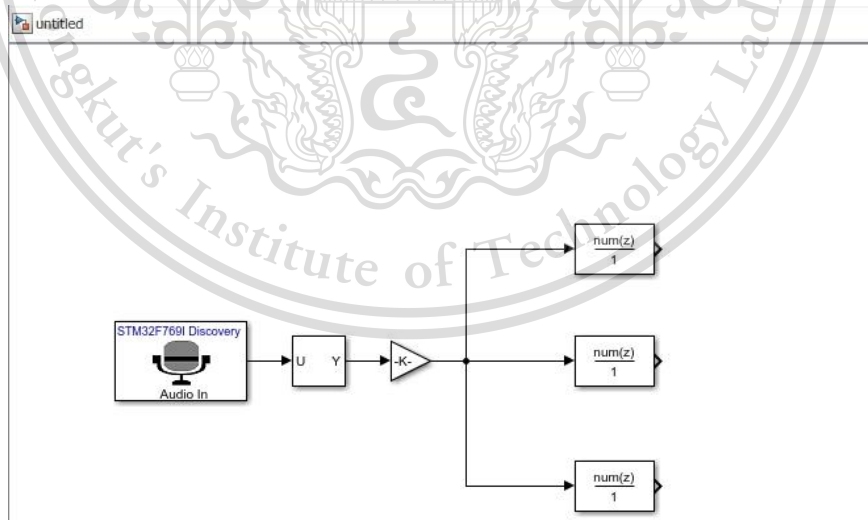
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.20 ตั้งค่าบล็อก Discrete FIR Filter ตัวที่ 3

จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete FIR Filter ทั้ง 3 บล็อก ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete FIR Filter ทั้ง 3 บล็อก

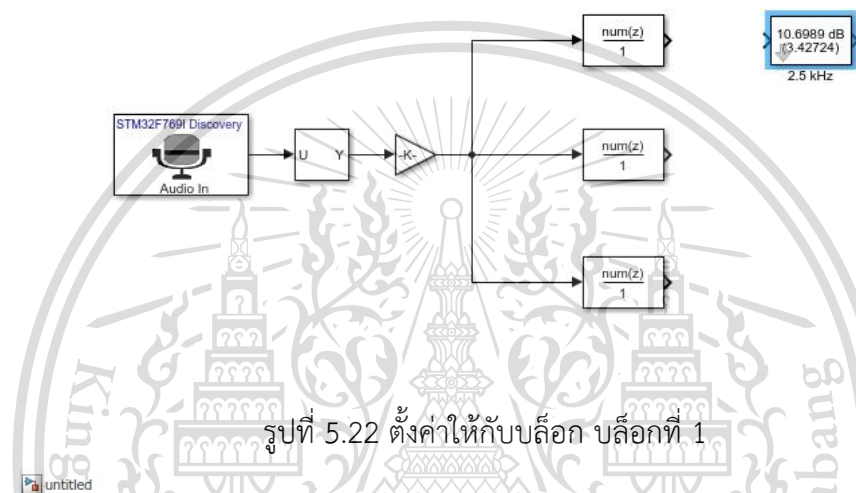
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

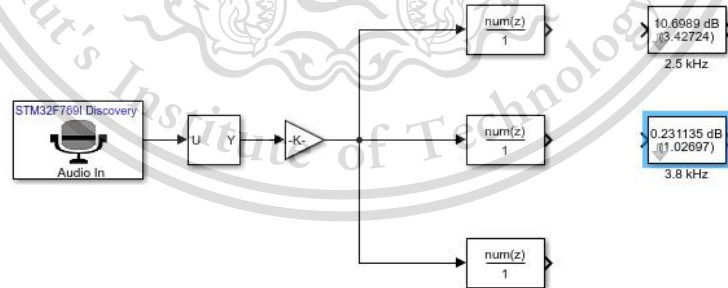
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการลากบล็อก ทั้ง 3 บล็อกออกมาวางในพื้นี่หน้าต่าง โดยตั้งค่าให้กับบล็อกทั้ง 3 ดังรูปที่ 5.22, 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ

untitled



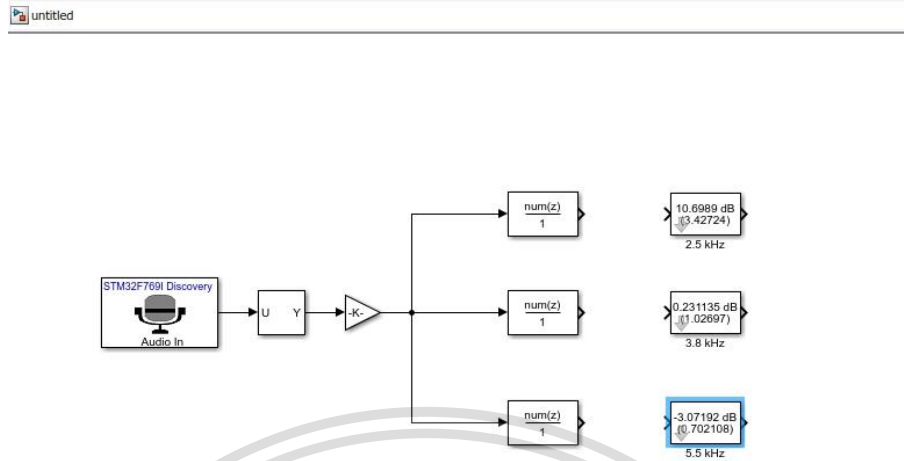
untitled



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

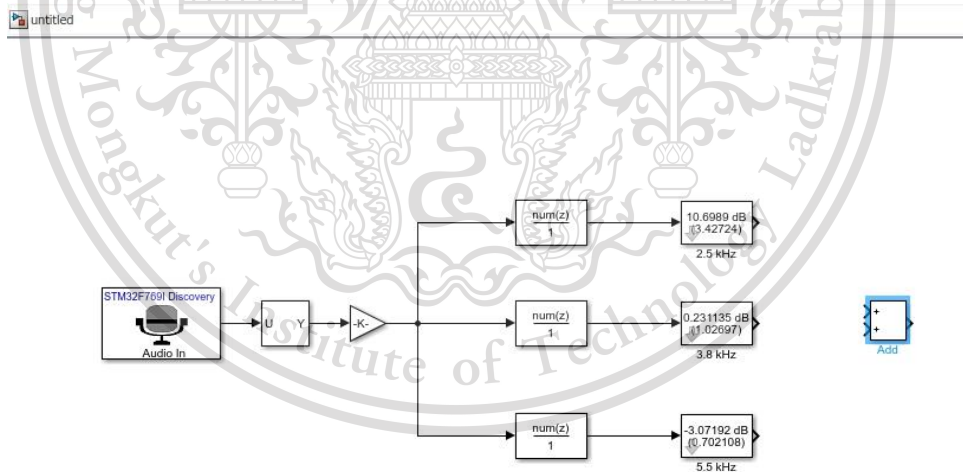
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.24 ตั้งค่าให้กับบล็อก บล็อกที่ 3

ทำการลากบล็อก sum ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง แล้วตั้งค่าให้กับบล็อก sum ดังรูปที่ 5.25 และ 5.26 ตามลำดับ จากนั้นแล้วทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.25 ลากบล็อก sum ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง

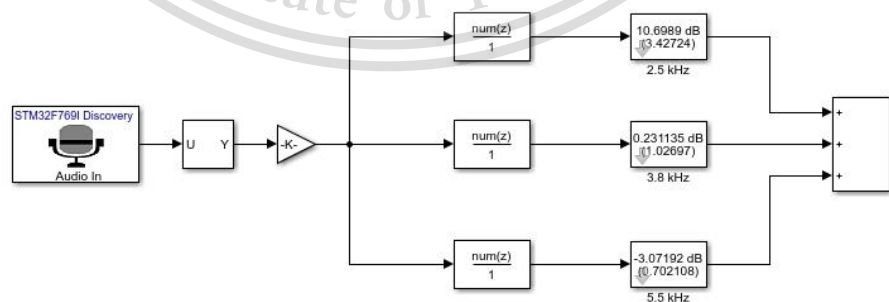
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.26 ตั้งค่าบล็อก sum



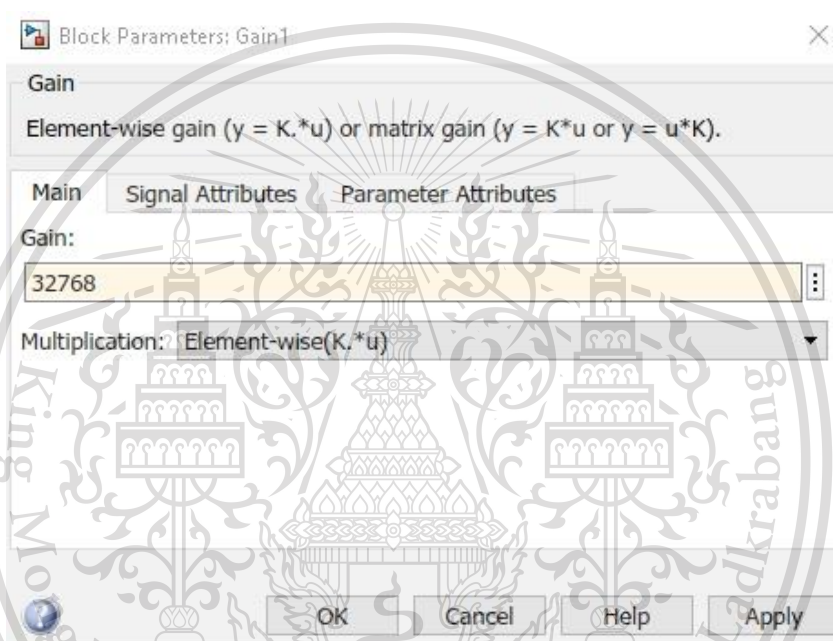
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5.27 ทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 5.10 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวาง ภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink แล้วทำการตั้งค่าบล็อกดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 โดย กำหนดค่า gain เป็น 32,768 และ Output data type เป็น int 16 หลังจากทำการตั้งค่าจะได้ บล็อก Gain ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.30

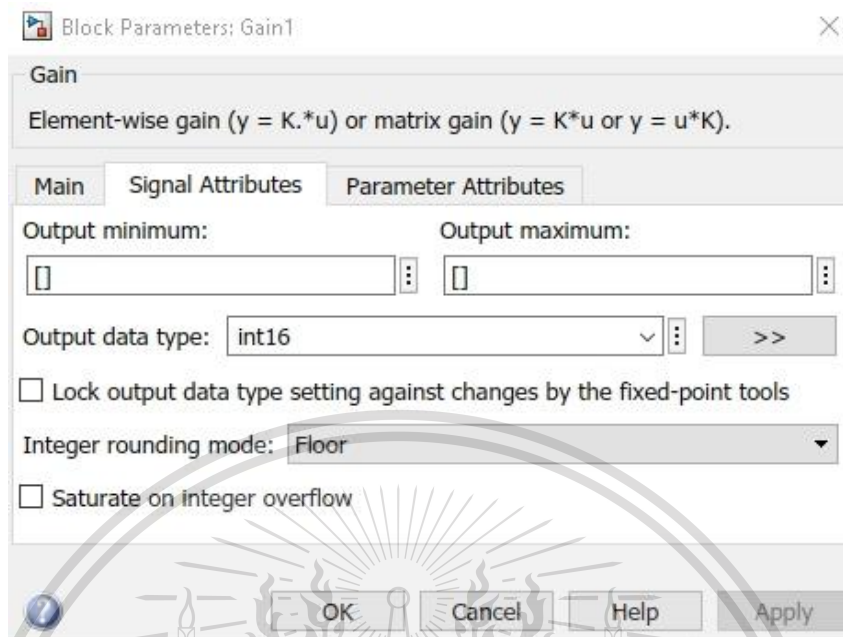


รูปที่ 5.29 ตั้งค่าบล็อก Gain

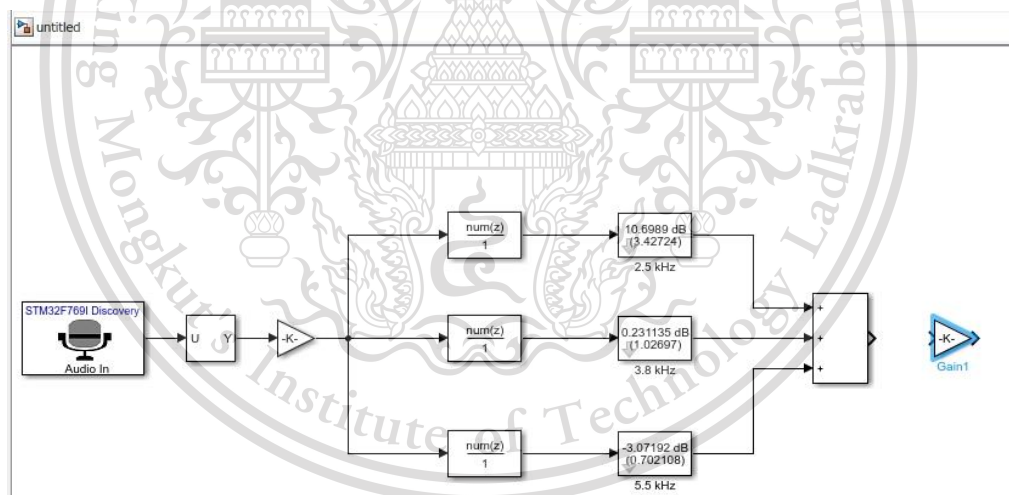
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.29 ตั้งค่าบล็อก Gain



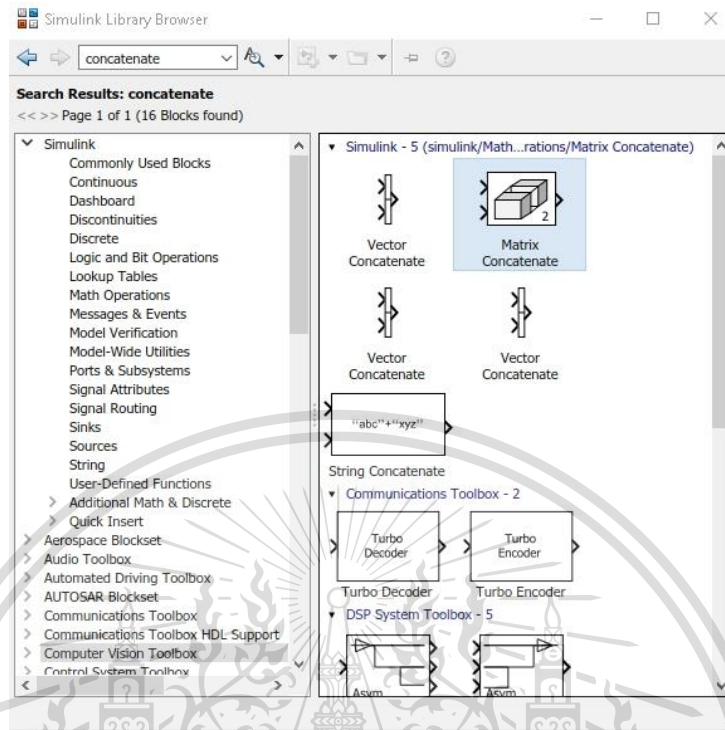
รูปที่ 5.30 บล็อก Gain ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.31 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.32

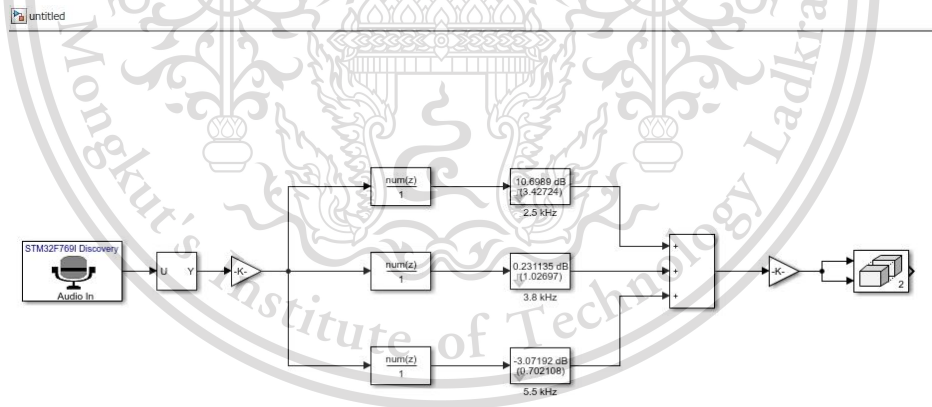
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนไวสาหรบการเซงานเพอการรศกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.31 Matrix Concatenate (1)

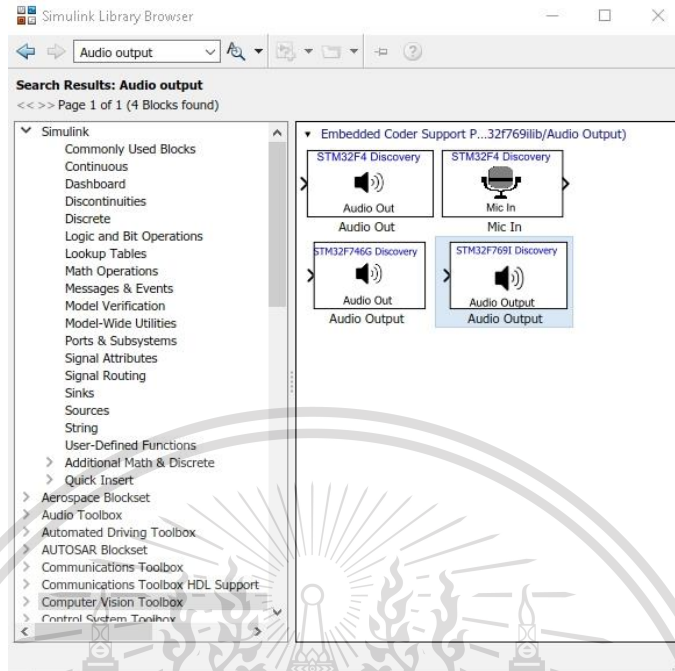


รูปที่ 5.32 ทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก Matrix Concatenate และ gain (1)

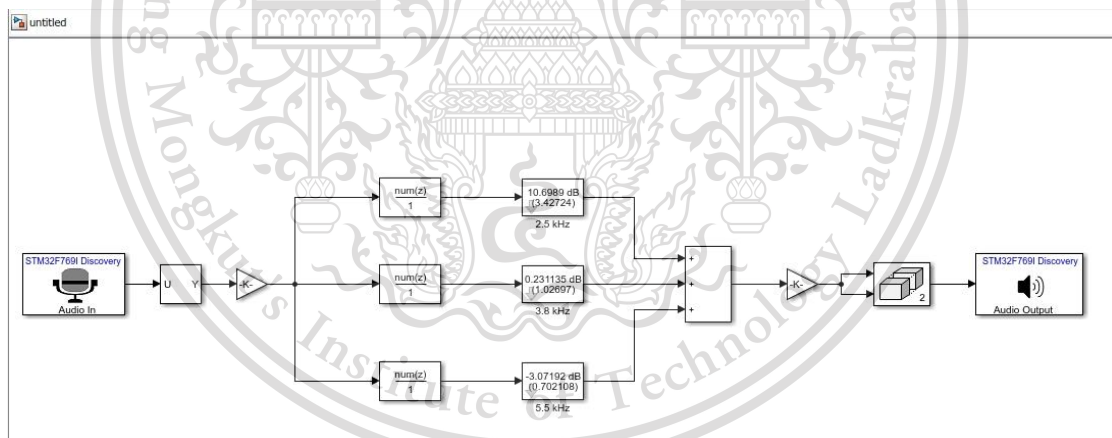
ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Audio Output แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Output ดังรูปที่ 5.33 จากนั้นให้ทำการ ลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่าง เอกสารนี้เป็น บล็อก Audio Output และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.34 กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.33 Audio output



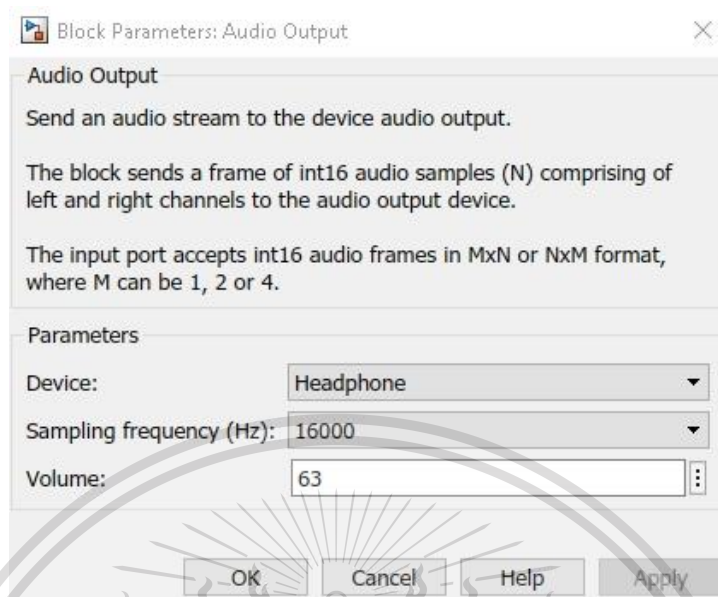
รูปที่ 5.34 ทำการลากเส้นเชื่อมวงจร

ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Output โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 16,000 Hz, Device เป็น Headphone และ Volume เป็น 63 ดังรูปที่ 5.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

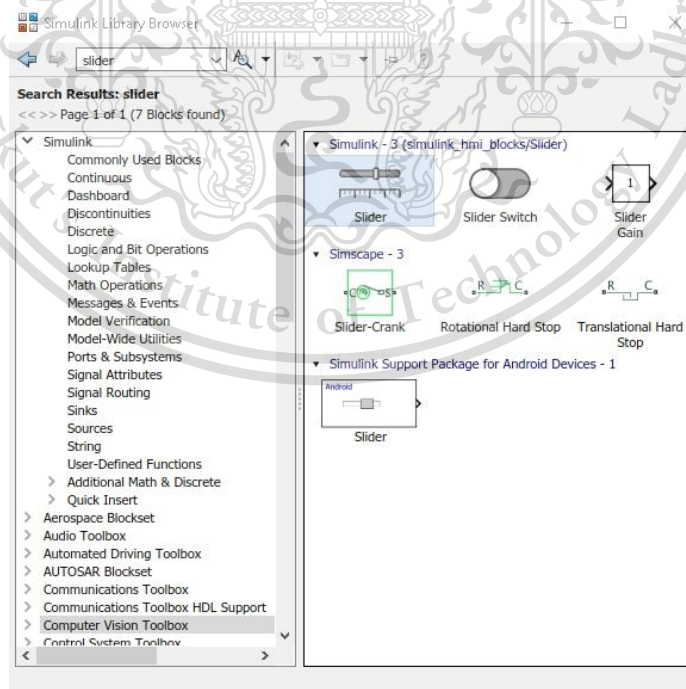
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.35 การตั้งค่าบล็อก Audio output

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Slider แล้วทำการเลือก Slider ดังรูปที่ 5.36 จากนั้นทำการลาก Slider ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง แล้วทำการตั้งค่า Slider แถบที่ 1 ดังรูปที่ 5.37

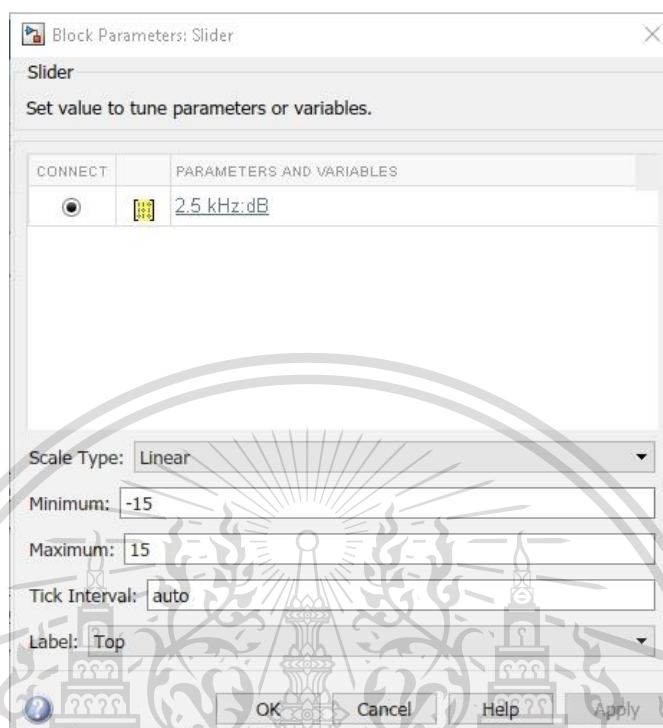


รูปที่ 5.36 Slider

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.37 การตั้งค่า Slider

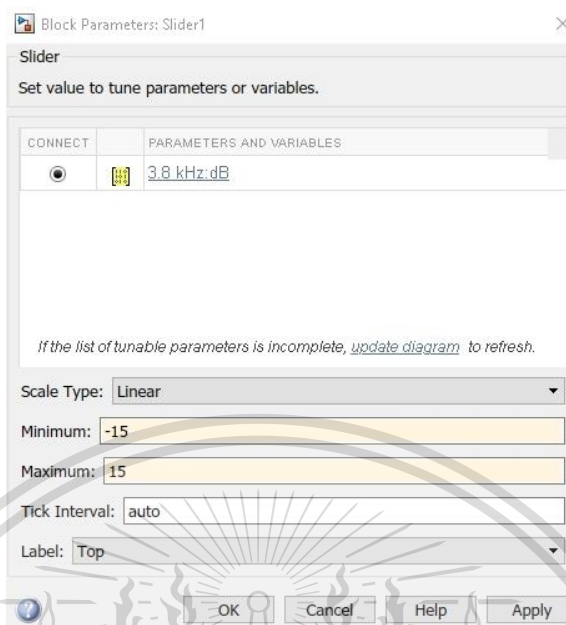
จากรูปที่ 5.37 เป็นการเชื่อมต่อ slider เพื่อให้สามารถปรับค่าแบบ External mode ได้ โดยการเข้าไปที่การตั้งค่าของ Slider จากนั้นทำการคลิกบล็อกที่เราต้องการเชื่อมต่อจากนั้นในหน้าต่างการตั้งค่า Slider จะปรากฏชื่อของบล็อกนั้นขึ้นมา เช่นในรูปที่ 5.37 ทำการเชื่อมต่อกับบล็อกที่มีชื่อว่า 2.5 kHz: dB จากนั้นทำการปรับค่า min และ max เป็น -15 และ 15 ตามลำดับ

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Slider แล้วทำการเลือก Slider ดังรูปที่ 5.36 จากนั้นทำการลาก Slider ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง แล้วทำการตั้งค่า Slider แถบที่ 2 ดังรูปที่ 5.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.38 การตั้งค่า Slider

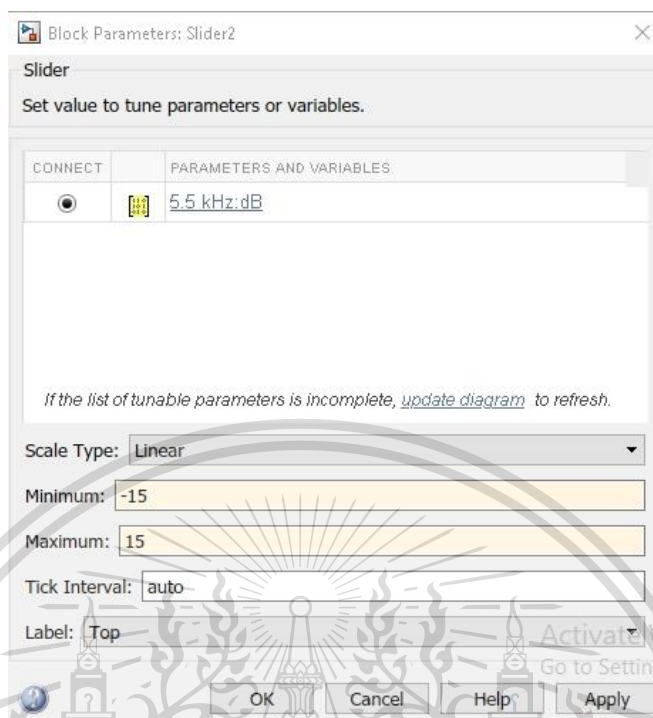
จากรูปที่ 5.38 เป็นการเชื่อมต่อ slider เพื่อให้สามารถปรับค่าแบบ External mode ได้ โดยการเข้าไปที่การตั้งค่าของ Slider จากนั้นทำการคลิกบล็อกที่เราต้องการเชื่อมต่อจากนั้นในหน้าต่างการตั้งค่า Slider จะปรากฏชื่อของบล็อกนั้นขึ้นมา เช่นในรูปที่ 5.38 ทำการเชื่อมต่อกับบล็อกที่มีชื่อว่า 3.8 kHz:dB จากนั้นทำการปรับค่า min และ max เป็น -15 และ 15 ตามลำดับ

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Slider แล้วทำการเลือก Slider ดังรูปที่ 5.36 จากนั้นทำการลาก Slider ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง แล้วทำการตั้งค่า Slider แถบที่ 3 ดังรูปที่ 5.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.39 การตั้งค่า Slider

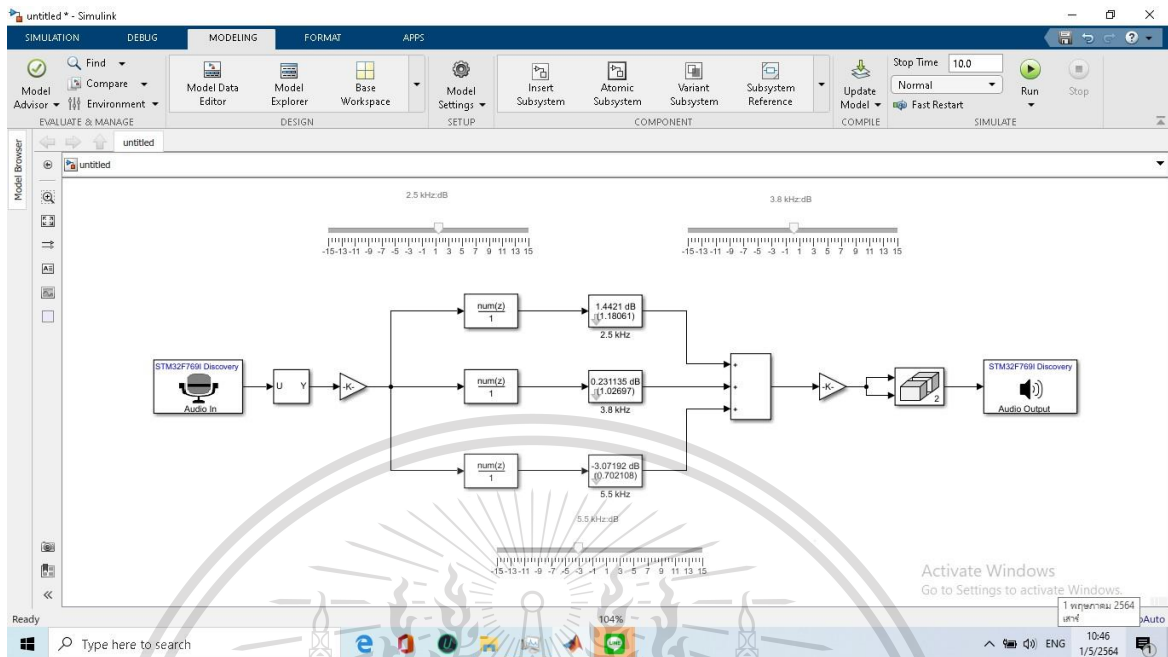
จากรูปที่ 5.39 เป็นการเชื่อมต่อ slider เพื่อให้สามารถปรับค่าแบบ External mode ได้ โดยการเข้าไปที่การตั้งค่าของ Slider จากนั้นทำการคลิกบล็อกที่เราต้องการเชื่อมต่อจากนั้นในหน้าต่างการตั้งค่า Slider จะปรากฏชื่อของบล็อกนั้นขึ้นมา เช่นในรูปที่ 5.39 ทำการเชื่อมต่อกับบล็อกที่มีชื่อว่า 5.5 kHz: dB จากนั้นทำการปรับค่า min และ max เป็น -15 และ 15 ตามลำดับ

จะได้วงจร Simulink ของ Graphic Equalizer ที่สร้างจากการประยุกต์ใช้งาน FIR filter ที่ออกแบบด้วยวิธี windowing ดังรูปที่ 5.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.40 วงจร Graphic Equalizer

### 5.3 ผลการทดสอบการสร้าง Graphic Equalizer

ทดลองวัดผลการสร้าง Real Time 3-band Graphic Equalizer ใน frequency domain โดยใช้ Dynamic Signal Analyzer วัด Total Amplitude Response 2 คุณลักษณะจะได้ผลดังนี้

1) ทดลองวัด Total Amplitude Response โดยการปรับให้ค่าเกณฑ์ทั้ง 3 แบนด์เท่ากับ 0 dB จะได้ Amplitude Response เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.41 ผลการวัด total amplitude response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยให้ค่าเกนทุกแบนด์เท่ากับ 0 dB

2) ทดลองวัด Total Amplitude Response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยการปรับค่าเกนดังนี้

ค่าเกนของ Lowpass filter: -15 dB

ค่าเกนของ Bandpass filter: 12 dB

ค่าเกนของ Highpass filter: 0 dB

ซึ่งจะได้ Amplitude Response ดังรูปที่ 5.42 ซึ่งได้ค่า amplitude ตรงตามทีปรับค่าไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.42 ผลการวัด total amplitude response ของ Real Time 3-band Graphic Equalizer โดยให้ค่าเกณฑ์ของ Lowpass filter -15 dB, ค่าเกณฑ์ของ Bandpass filter 12 dB และค่าเกณฑ์ของ Highpass filter 0 dB

Real Time 3-band Graphic Equalizer สามารถทำการปรับค่าเกณฑ์ต่างๆ เพื่อดู Frequency Response แบบ Real Time ได้

## 5.4 การประยุกต์ใช้งาน IIR Filter

### 5.4.1 Peaking filter

Peaking filter เป็น filter รูปแบบเฉพาะซึ่งไม่ได้ใช้วิธีการออกแบบเหมือนกับ 2 วิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น เป็น IIR Filter รูปแบบหนึ่งซึ่ง transfer function ของ peaking filter ที่ปริยญาณิพนธ์นี้ใช้ในการออกแบบเป็นดังสมการที่ 5.1

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (5.1)$$

โดยที่เราจะนำ Peaking filter ไปใช้งานร่วมกับ low boost/cut shelving filter และ high boost/cut shelving filter ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้เป็น Parametric Equalizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 5.4.2 Parametric Equalizer

Parametric Equalizer เป็นการประยุกต์ใช้งาน IIR filter โดยนำ IIR filter มาต่อกันแบบ cascade โดยผู้จัดทำทำการออกแบบจาก Transfer function ในรูปทั่วไปของ IIR filter ดังแสดงในสมการที่ 5.1 ซึ่งจะมีค่าที่ไม่ทราบค่า 5 ค่า คือ สัมประสิทธิ์และจำนวน band ที่ใช้อยู่ที่ 4 – 7 band ประกอบด้วย filter 3 ประเภทดังนี้

1) low boost/cut shelving filter

low boost/cut shelving filter เป็น low-pass filter ที่สามารถปรับค่าเกน (G) และ cutoff frequency ( $f_c$ ) ได้ ออกแบบจาก Transfer function ดังสมการที่ 5.2

$$H_{LS}(z) = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1) + 2(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 1)z^{-1} + (G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)z^{-2}}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2) + 2(\Omega^2 - G^{\frac{1}{2}})z^{-1} + (G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)z^{-2}} \quad (5.2)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

$$\Omega = \tan(\omega_c / 2)$$

$$G = 10^{\frac{\text{Gain(dB)}}{20}}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ Transfer function สมการที่ 5.1 กับ สมการที่ 5.2 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$a_0 = \frac{2(\Omega^2 - G^{\frac{1}{2}})}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$a_1 = \frac{(G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_0 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_1 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(2G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_2 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

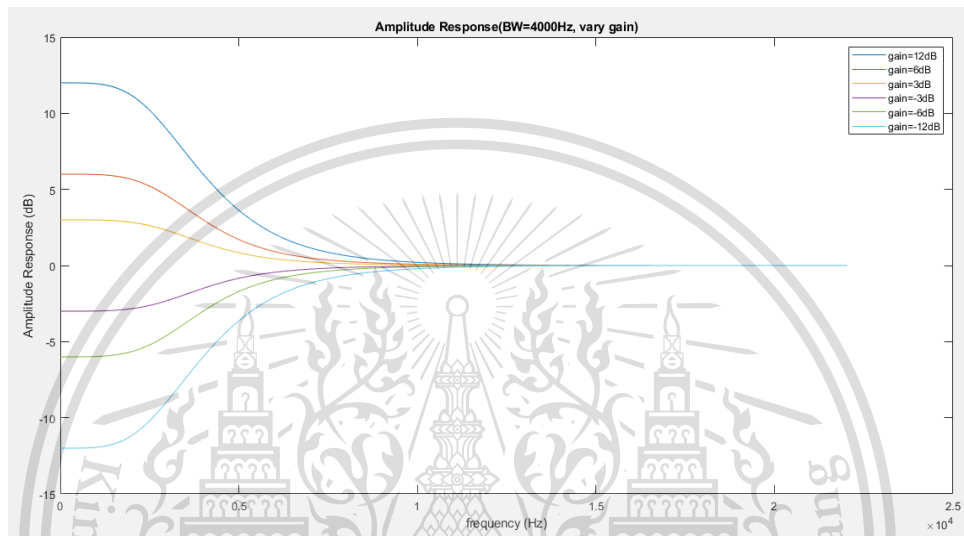
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

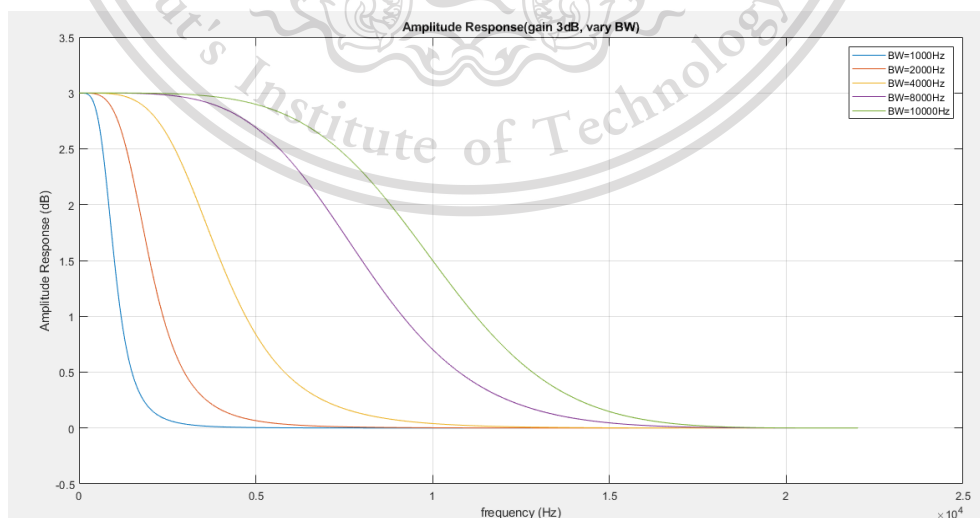
จากค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าเกน (G) และ cutoff frequency ( $f_c$ ) โดยพารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่าเกน และ พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับ cutoff frequency นำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่ามา จะได้คุณสมบัติดังนี้

1.1) ทดลองคงค่า = 4000 Hz และเปลี่ยนแปลงค่าเกน ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.43 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเกน

1.2) ทดลองคงค่าเกน  $G = 3$  dB และเปลี่ยนแปลงค่า เกน ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย King Mongkut's Institute of Technology Ladkrang รูปที่ 5.44 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า G ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) peaking filter (EQ band)

peaking filter (EQ band) เป็น filter ที่สามารถปรับค่าเกน (G), cutoff frequency (fc) และ bandwidth (B) ได้ ออกแบบจาก Transfer function ตามสมการที่ 5.3 ซึ่ง จะส่งผลให้ filter ที่ได้มีคุณสมบัติเป็น band-pass filter (peaking filter) หรือ band-stop filter (notch filter) ขึ้นอยู่กับค่าเกน

$$H_{PN}(z) = \frac{(\sqrt{G} + G \tan(B/2)) - (2\sqrt{G} \cos(\omega_c))z^{-1} + (\sqrt{G} - G \tan(B/2))z^{-2}}{(\sqrt{G} + \tan(B/2)) - (2\sqrt{G} \cos(\omega_c))z^{-1} + (\sqrt{G} - \tan(B/2))z^{-2}} \quad (5.3)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

$$B = 2\pi f_{BW} / f_s$$

$$G = 10^{\frac{\text{Gain(dB)}}{20}}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ Transfer function สมการที่ 5.1 กับ สมการที่ 5.3 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$a_0 = \frac{-2\sqrt{G} \cos(\omega_c)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$a_1 = \frac{\sqrt{G} - \tan(B/2)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$b_0 = \frac{\sqrt{G} + G \tan(B/2)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$b_1 = \frac{-2\sqrt{G} \cos(\omega_c)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{G} - G \tan(B/2)}{(\sqrt{G} + \tan(B/2))}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าเกน (G), cutoff frequency (fc) และ bandwidth (B) โดยพารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่าเกน พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับ cutoff frequency และ พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่า bandwidth ซึ่งเราสามารถกำหนดค่า quality factor ได้จากสมการที่ (5.4) แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่ามาออกแบบ peaking filter จะได้ คุณสมบัติดังนี้

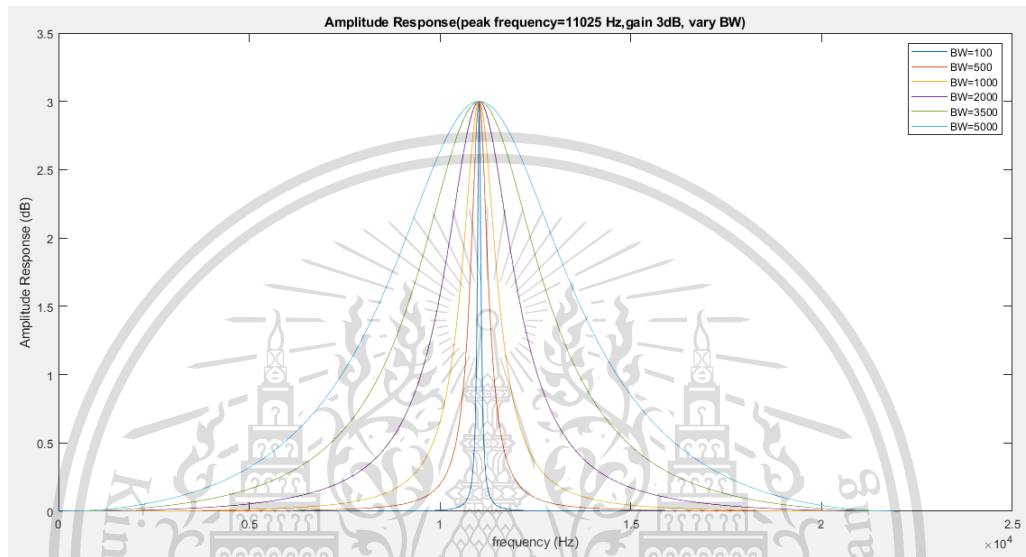
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

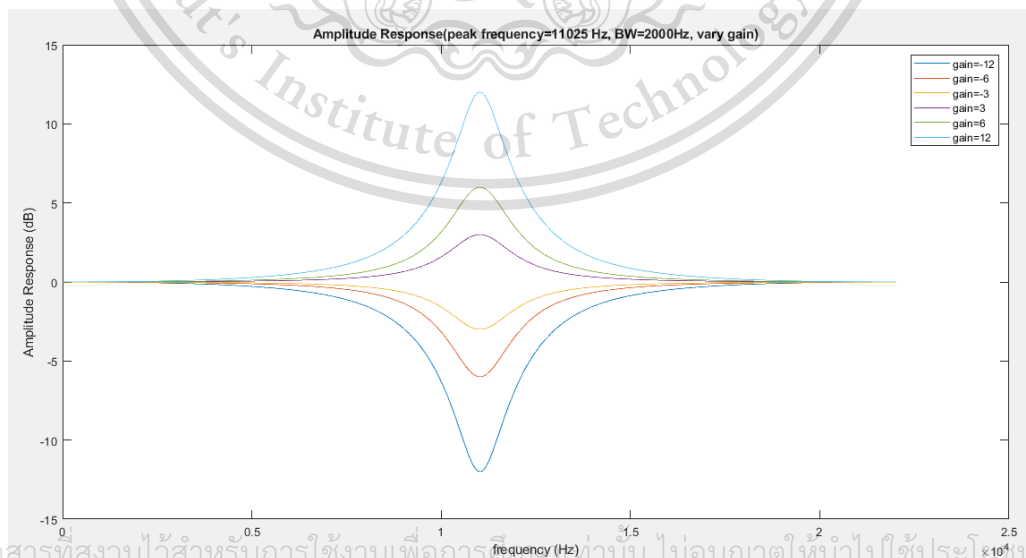
$$Q = \frac{\omega_c}{B} \tag{5.4}$$

2.1) ทดลองคงค่า = 11025 Hz, G = 3dB และเปลี่ยนแปลงค่า B ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า B

2.2) ทดลองคงค่า = 11025 Hz, B = 2000 Hz และเปลี่ยนแปลงค่า G ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.46



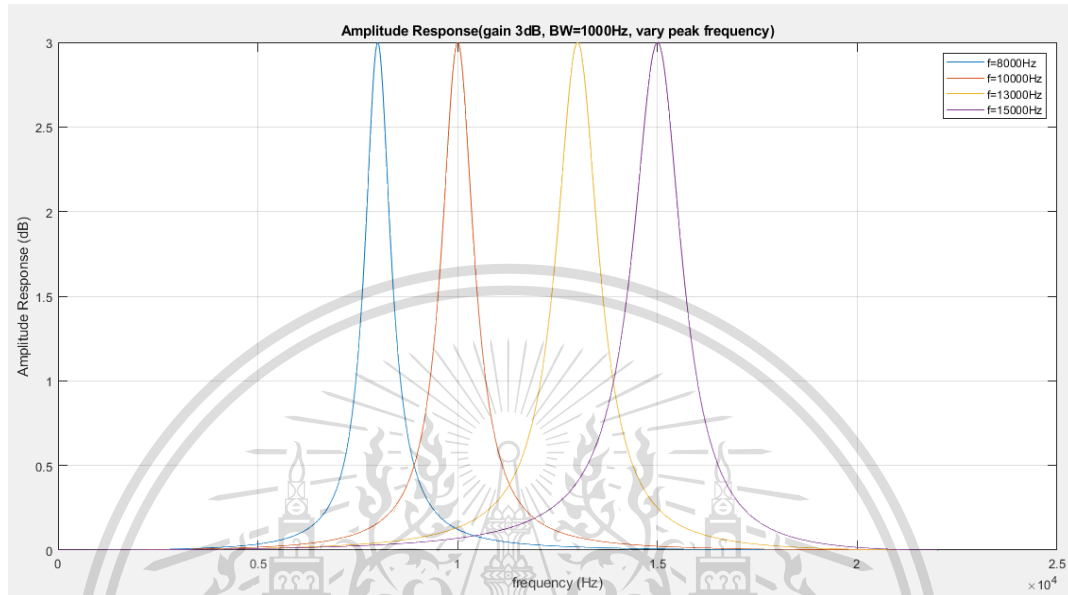
รูปที่ 5.46 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3) ทดลองคงค่า  $G = 3 \text{ dB}$ ,  $B = 1000 \text{ Hz}$  และเปลี่ยนแปลงค่า ได้  
 กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.47



รูปที่ 5.47 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า

3) high boost/cut shelving filter

high boost/cut shelving filter เป็น high-pass filter ที่สามารถปรับค่าเกน (G) และ cutoff frequency ได้ ออกแบบจาก Transfer function ดังสมการที่ 5.5

$$H_{HS}(z) = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2}) - 2(G^{\frac{1}{2}} - \Omega^2)z^{-1} + (G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2})z^{-2}}{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1}) + 2(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 1)z^{-1} + (G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1})z^{-2}} \quad (5.5)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_c = 2\pi f_c / f_s$$

$$\Omega = \tan(\omega_c / 2)$$

$$G = 10^{\frac{\text{Gain}(dB)}{20}}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของ Transfer function สมการที่ 5.1 กับ สมการที่ 5.5 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$a_0 = \frac{2G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - 2}{(G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1)}$$

$$a_1 = \frac{G^{\frac{1}{2}}\Omega^2 - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + 1}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

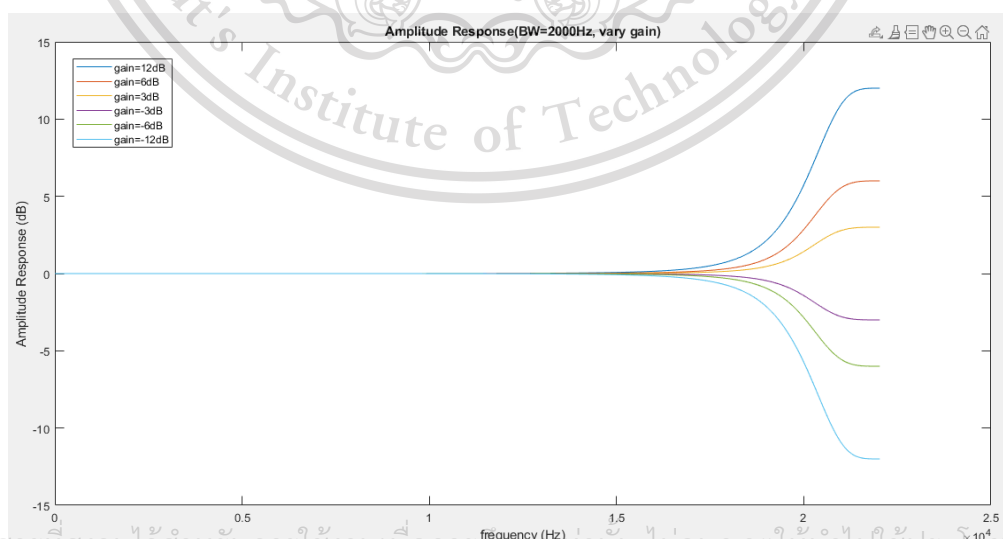
$$b_0 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_1 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(-2G^{\frac{1}{2}} + 2\Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

$$b_2 = G^{\frac{1}{2}} \frac{(G^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}{(G^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2}\Omega G^{\frac{1}{4}} + \Omega^2)}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าเกน (G) และ cutoff frequency (fc) โดยพารามิเตอร์ สัมพันธ์กับค่าเกน และ พารามิเตอร์ สัมพันธ์กับ cutoff frequency นำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 5 ค่ามาออกแบบ high boost/cut shelving filter จะได้คุณสมบัติดังนี้

3.1) ทดลองคงค่า = 20050 Hz และเปลี่ยนแปลงค่าเกน ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.48

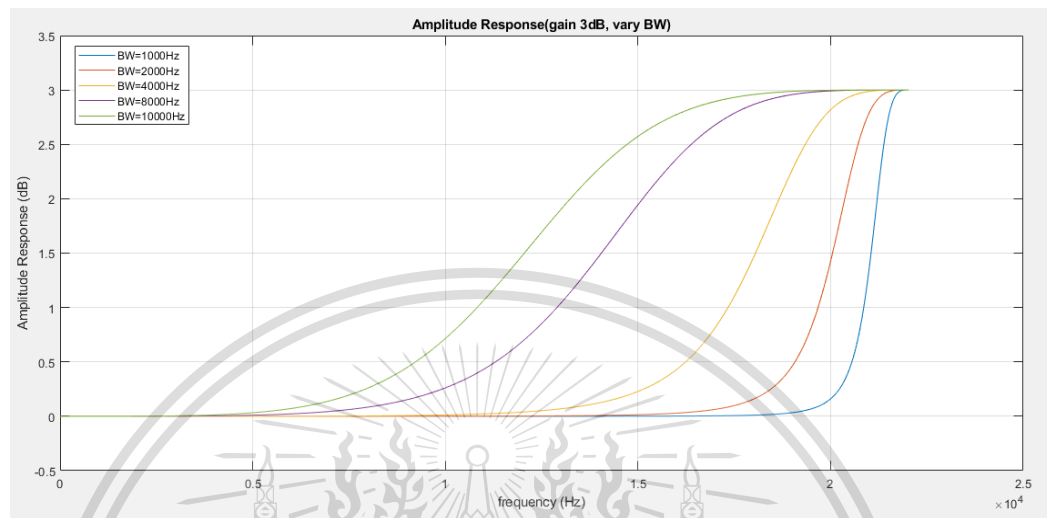


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.48 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเกน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

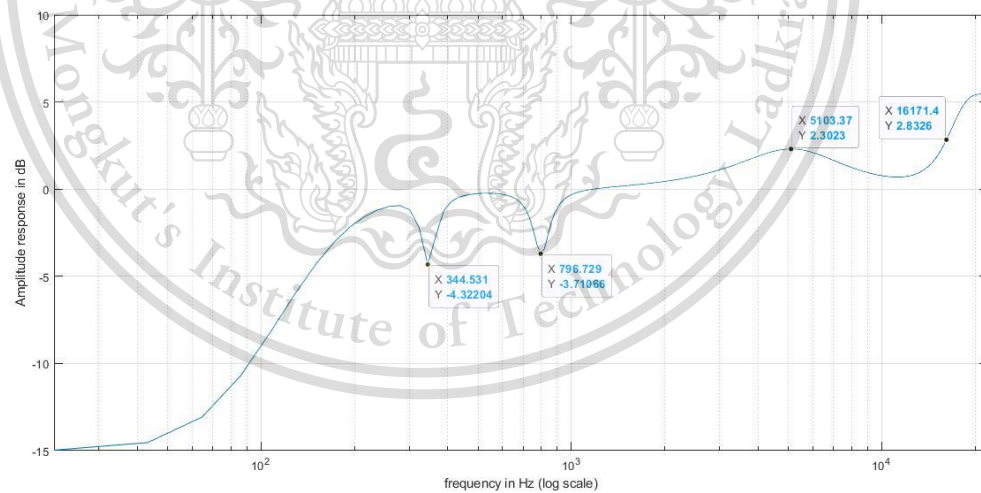
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2) ทดลองคงค่าเกน  $G = 3$  dB และเปลี่ยนแปลงค่า ได้กราฟ amplitude response ดังรูปที่ 5.49



รูปที่ 5.49 กราฟ Amplitude response ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า และเมื่อทำการพล็อตกราฟ Amplitude response ของ parametric equalizer จะได้ดังรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 กราฟ Amplitude response ของ parametric equalizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.5 การออกแบบ Parametric Equalizer

โดยในส่วนของขั้นตอนการสร้าง Parametric Equalizer ที่สร้างจากการประยุกต์ใช้งาน Peaking filter, Low boost cut filter และ High boost cut filter สามารถทำได้ด้วยการต่อบล็อก Simulink ใน Matlab ดังนี้

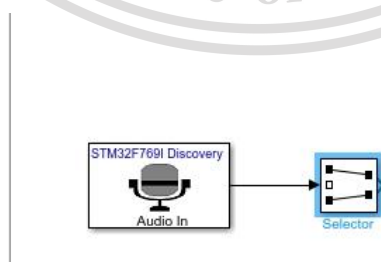
ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Audio Input แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Input ดังรูปที่ 5.3 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 ลากบล็อก Audio Input ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (2)

จากนั้นทำการตั้งค่าบล็อก Audio Input โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 44,100 Hz, Device เป็น Lineln และ Samples per frame เป็น 1,024 ดังรูปที่ 5.5

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Selector แล้วทำการเลือกบล็อก Selector ดังรูปที่ 5.6 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector ดังรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.52 ลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Audio Input และ Selector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Selector โดยกำหนดให้ Number of input dimensions เป็น 2 และ Index mode เป็น One-based ดังรูปที่ 5.8 แล้วทำการกด OK จะได้ บล็อก Selector ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.53

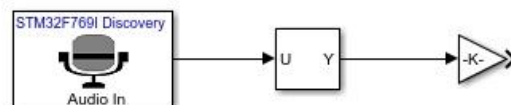
untitled



รูปที่ 5.53 บล็อก Selector ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 5.10 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain ดังรูปที่ 5.54

untitled



รูปที่ 5.54 ลากบล็อก Gain ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Selector และ Gain (2)

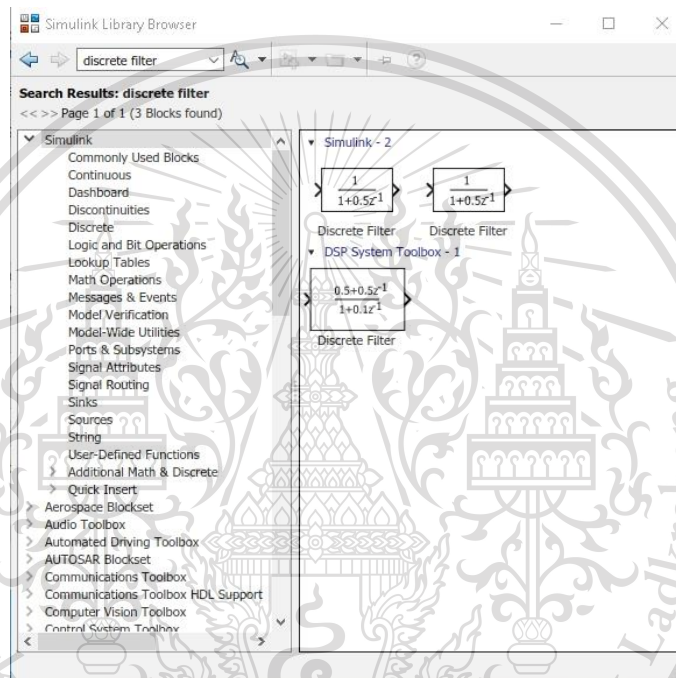
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

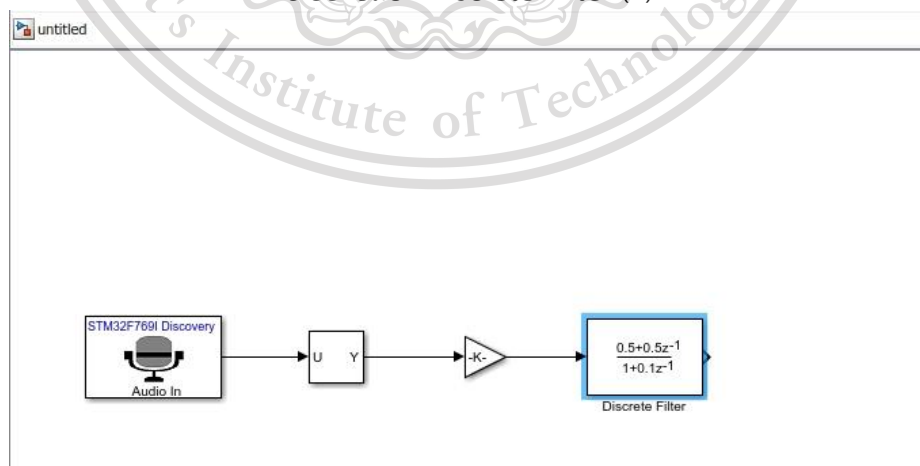
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการตั้งค่าบล็อก Gain โดยกำหนดให้ค่า Gain เป็น  $1/32768$ , Multiplication เป็น Element-wise(K.\*u), Output data type เป็น double และ Integer rounding mode เป็น Floor ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ แล้วทำการกด OK

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องชอ้งค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.55 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete Filter ดังรูปที่ 5.56



รูปที่ 5.55 บล็อก Discrete Filter (2)

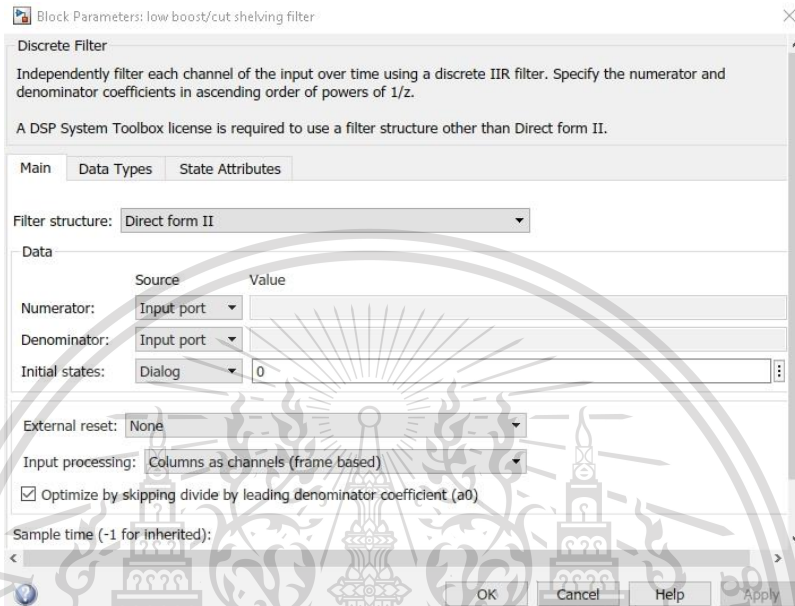


รูปที่ 5.56 ลากบล็อก Discrete Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete Filter

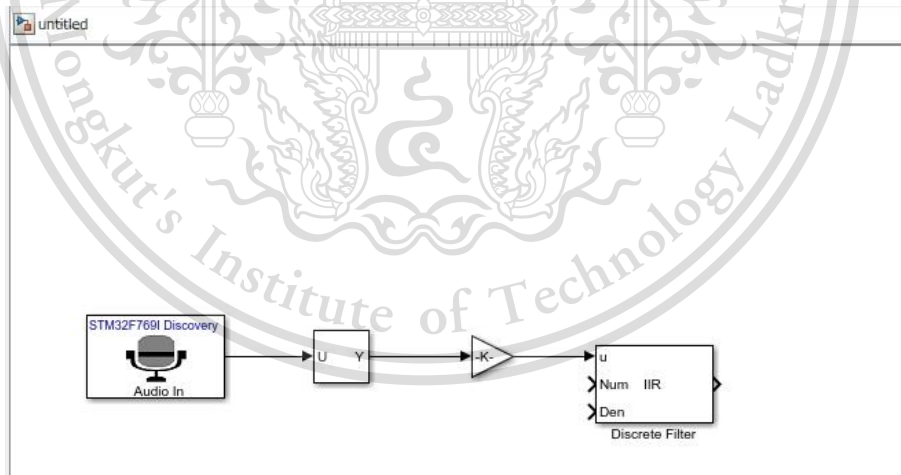
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.57 จากนั้นทำการกด OK จะได้ บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.58



รูปที่ 5.57 ตั้งค่าบล็อก Discrete Filter



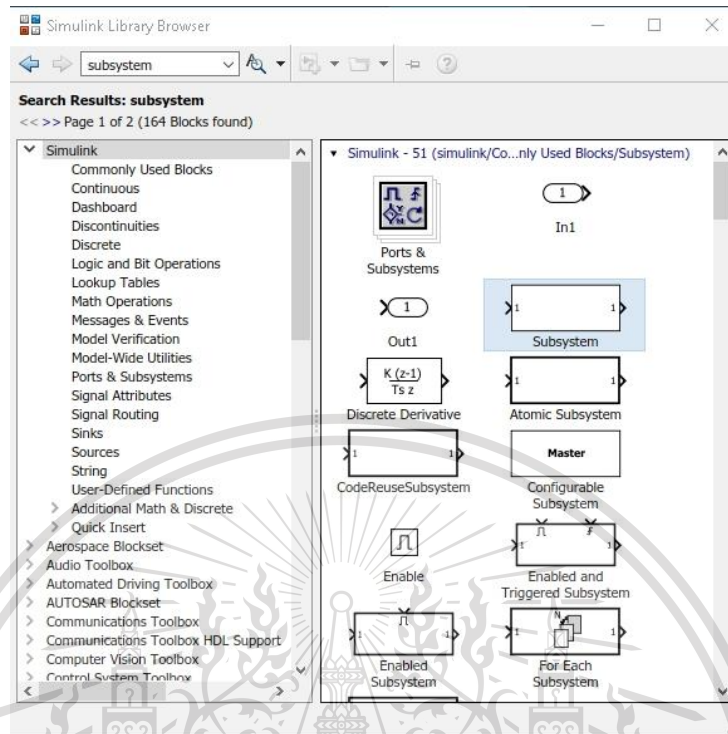
รูปที่ 5.58 บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหา subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก subsystem ดังรูปที่ 5.59 จากนั้นให้ทำการลาก บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.60

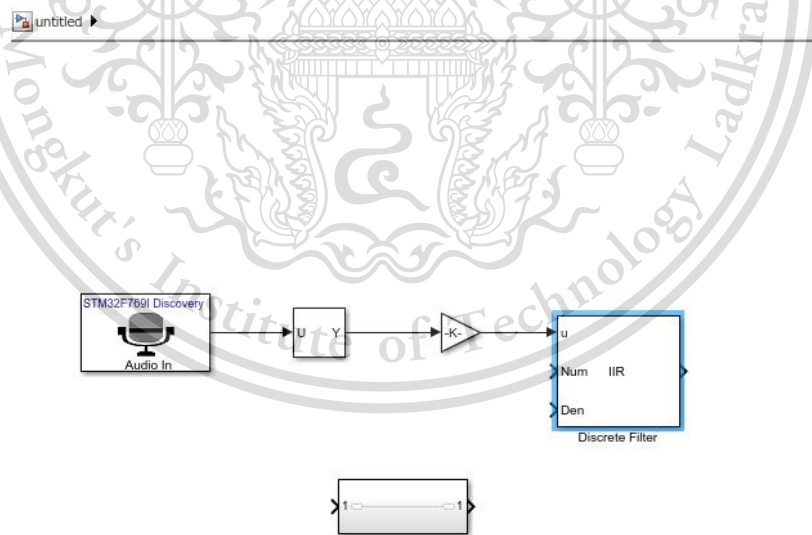
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.59 subsystem



รูปที่ 5.60 ลากบล็อก subsystem ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

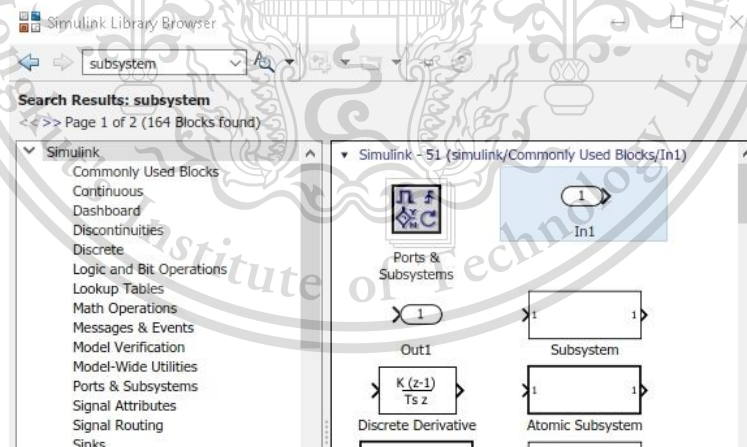
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก subsystem จะได้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 5.61



รูปที่ 5.61 หน้าต่าง subsystem

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก in1 ดังรูปที่ 5.62 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.63



รูปที่ 5.62 In1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

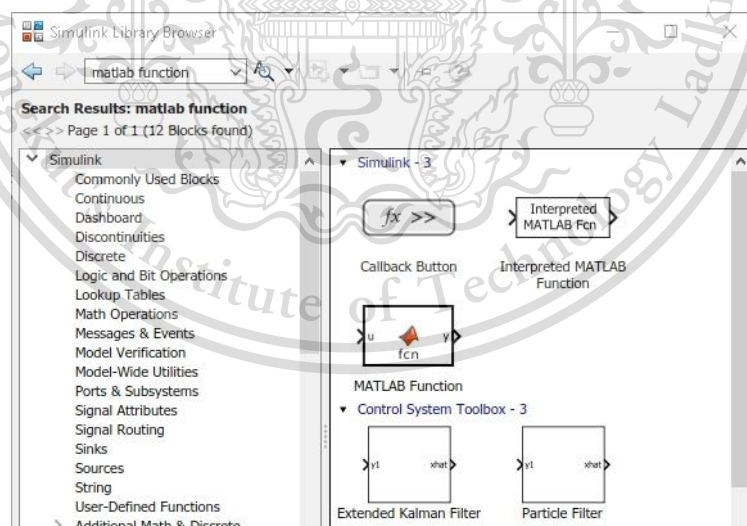
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.63 ลากบล็อก In1 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (1)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า matlab function แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function ดังรูปที่ 5.64 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.65

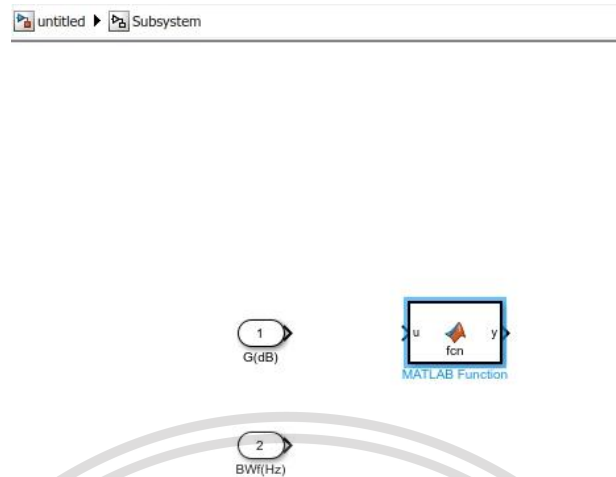


รูปที่ 5.64 matlab function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.65 ลากบล็อก matlab function ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (1)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่ matlab function จะปรากฏหน้าต่าง ให้เขียนคำสั่ง matlab ดังรูปที่ 5.66

```

1 function [a1,a2] = fcn(GdB,BWf)
2 -   Fs=44100;
3 -   G=10^(GdB/20);
4 -   wc=2*pi*BWf/Fs;
5 -   K = tan(wc/2);
6 -   a1 = ((2*K^2)-2*G^0.5)/(G^0.5+(2^0.5)*(G^0.25)*K+K^2);
7 -   a2 = (G^0.5-(2^0.5)*(G^0.25)*K+K^2)/(G^0.5+(2^0.5)*(G^0.25)*K+K^2);
8

```

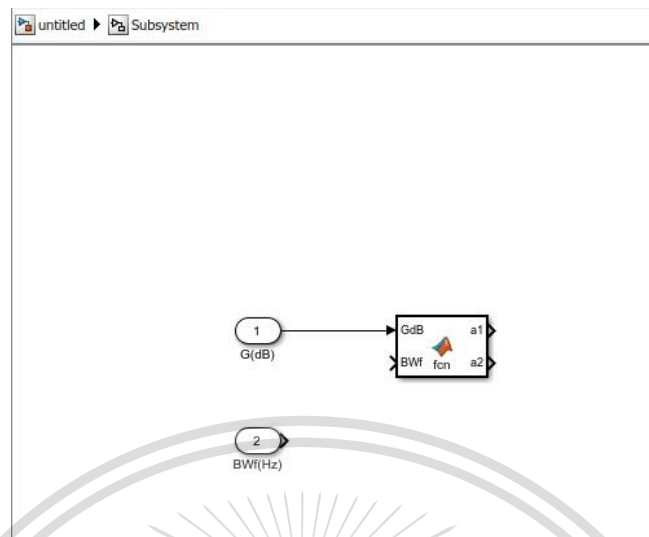
รูปที่ 5.66 คำสั่ง matlab ของ low boost cut (den)

จากนั้นทำการ run model แล้วลักษณะของบล็อก matlab function จะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 5.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.67 matlab function ของ low boost cut (den) เมื่อ run model แล้ว (1)

จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า matlab function อีกครั้ง แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function แล้วทำการเขียนคำสั่ง matlab ของ low boost cut (num) ดังรูปที่ 5.38 แล้ว run model จะได้รูปที่ 5.69

```

Editor - Block: untitled/Subsystem/MATLAB Function1*
+2 BPF_2nd.m HPF_2nd.m Subsystem/MATLAB Function Subsystem/MATLAB Function1*
1 function [b0,b1,b2] = fcn(GdB,BWf)
2   Fs=44100;
3   G=10^(GdB/20);
4   wc=2*pi*BWf/Fs;
5   K = tan(wc/2);
6   b0 = (G^0.5) * ((G^0.5) * (K^2) + (2^0.5) * (G^0.25) * K + 1) / ((G^0.5) + (2^0.5) * (G^0.25) * K + K^2);
7   b1 = (G^0.5) * ((2 * (K^2) * (G^0.5)) - 2) / ((G^0.5) + (2^0.5) * (G^0.25) * K + K^2);
8   b2 = (G^0.5) * ((G^0.5) * (K^2) - (2^0.5) * (G^0.25) * K + 1) / ((G^0.5) + (2^0.5) * (G^0.25) * K + K^2);

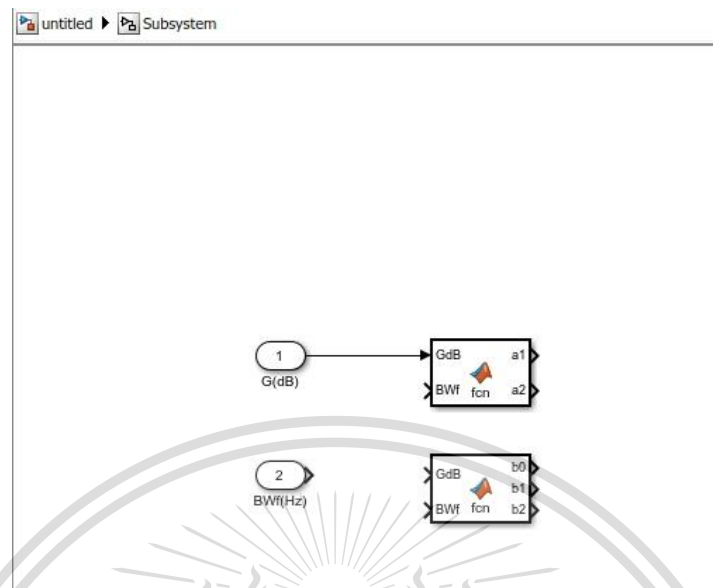
```

รูปที่ 5.68 คำสั่ง matlab ของ low boost cut (num)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

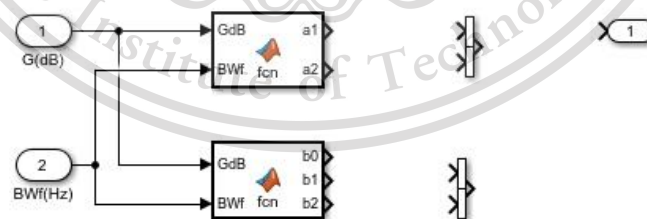
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.69 matlab function ของ low boost cut (num) เมื่อ run model แล้ว (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate จากนั้นให้ทำการลาก บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 อัน ดังรูปที่ 5.70 และทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดค่า number of input เป็น 3 ดังรูปที่ 5.71

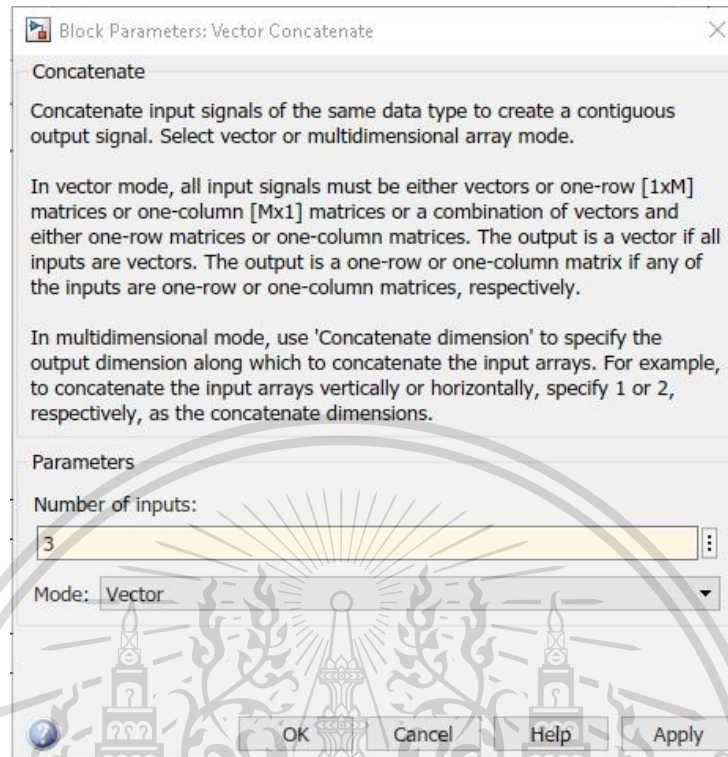


รูปที่ 5.70 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

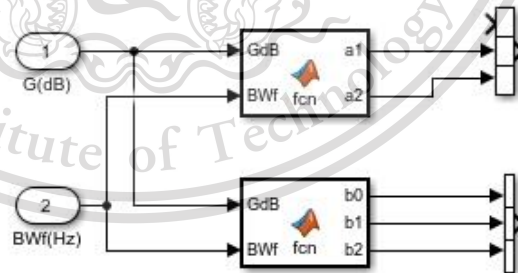
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.71 ตั้งค่า Matrix Concatenate

จากนั้นทำการเชื่อมต่อ Matrix Concatenate กับ Matlab function ดังรูปที่ 5.72



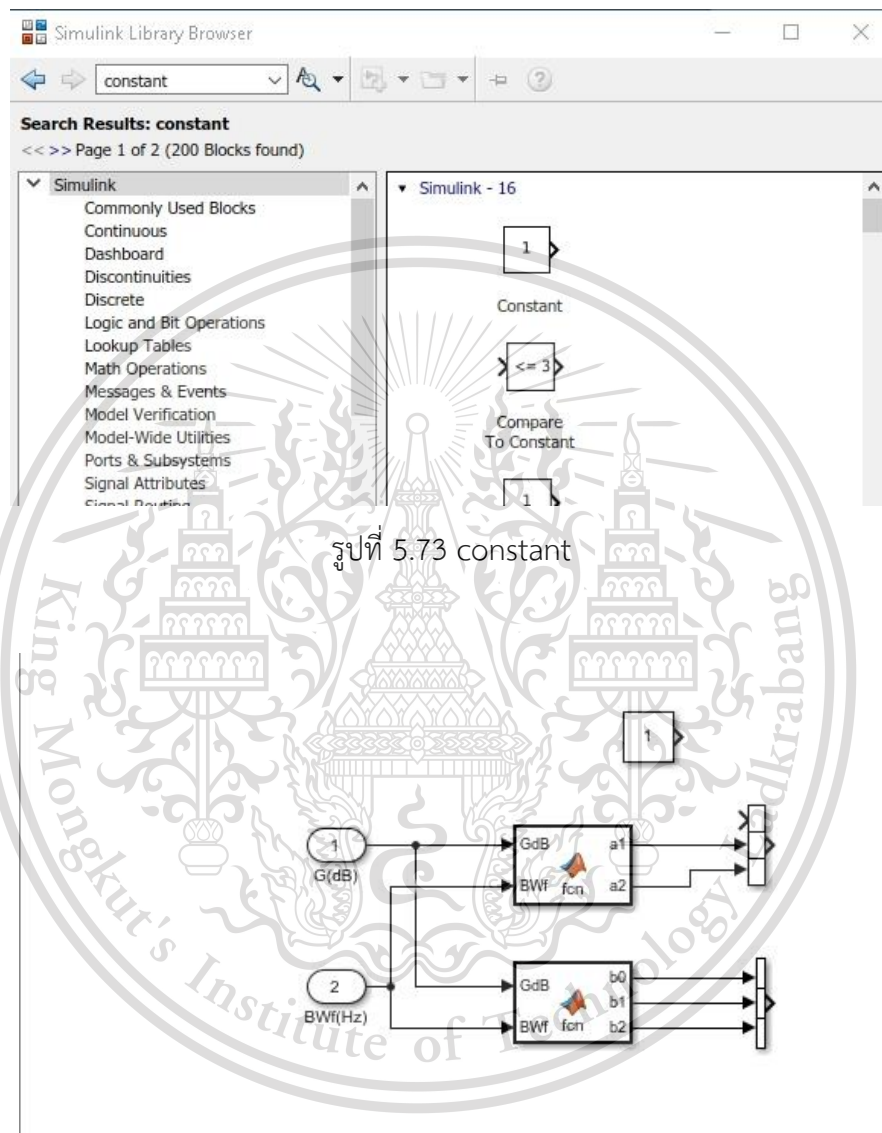
รูปที่ 5.72 เชื่อมต่อ Matrix Concatenate กับ Matlab function ใน subsystem (1)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant ดังรูปที่ 5.73 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gian และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.74



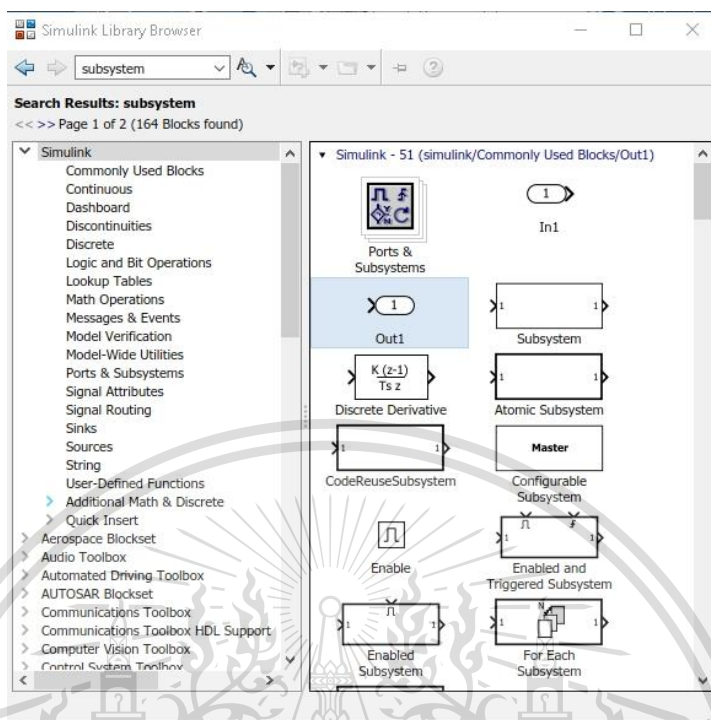
รูปที่ 5.74 ลากบล็อก constant ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (1)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก Out1 ดังรูปที่ 5.75 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Out1 และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.76 จะได้บล็อกการทำงานของ Low boost cut

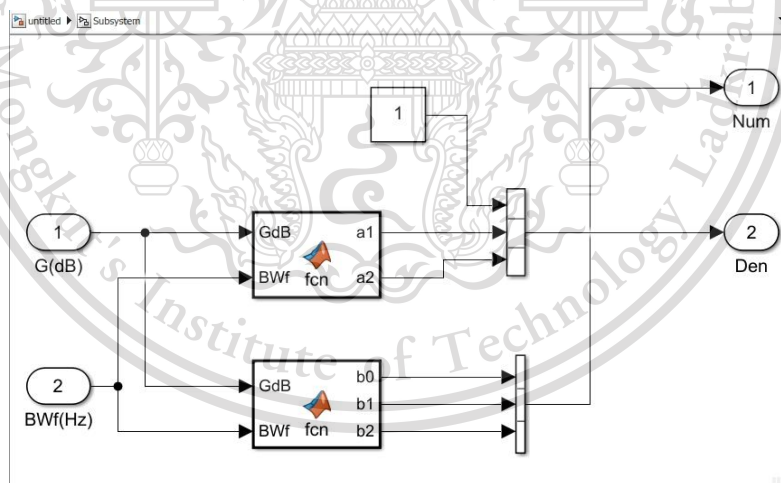
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.75 Out1



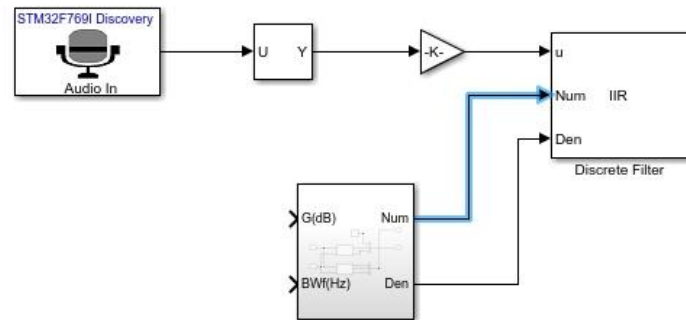
รูปที่ 5.76 วงจรการทำงานของ Low boost cut

จากนั้นทำการกลับมาที่หน้าต่างหลักของ Simulink แล้วทำการลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter จะได้ดังรูปที่ 5.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

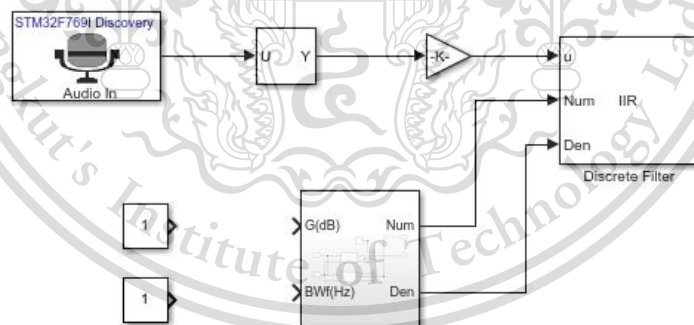
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.77 ลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter (1)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant ดังรูปที่ 5.73 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 บล็อก ดังรูปที่ 5.78 แล้วทำการ ตั้งค่าบล็อก constant ทั้งสอง ดังรูปที่ 5.86

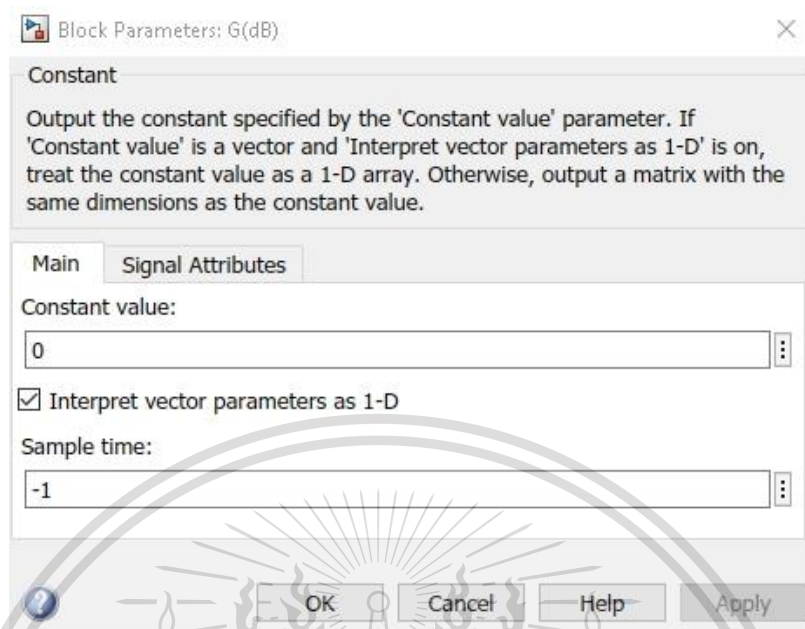


รูปที่ 5.78 ลากบล็อก constant ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

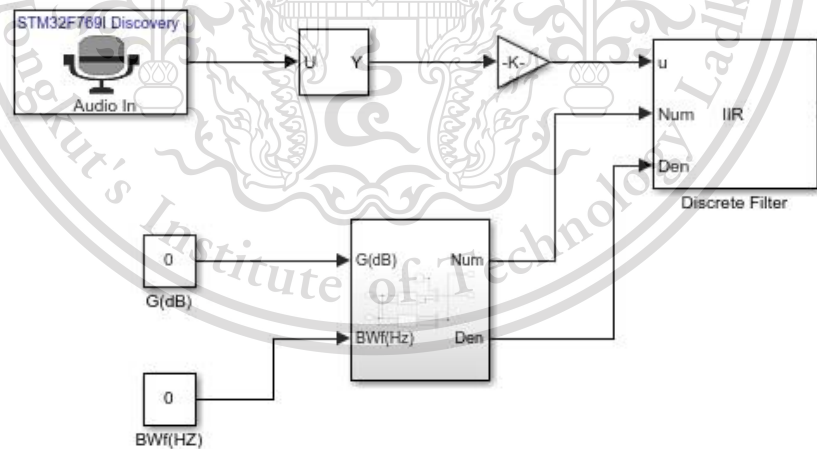
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.79 การตั้งค่าบล็อก constant (1)

จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก constant และ subsystem ดังรูปที่ 5.80  
จะได้วงจร low boost cut



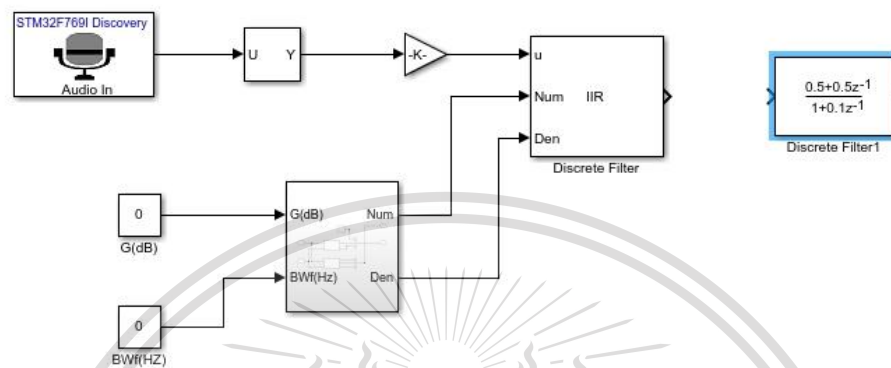
รูปที่ 5.80 วงจร low boost cut

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

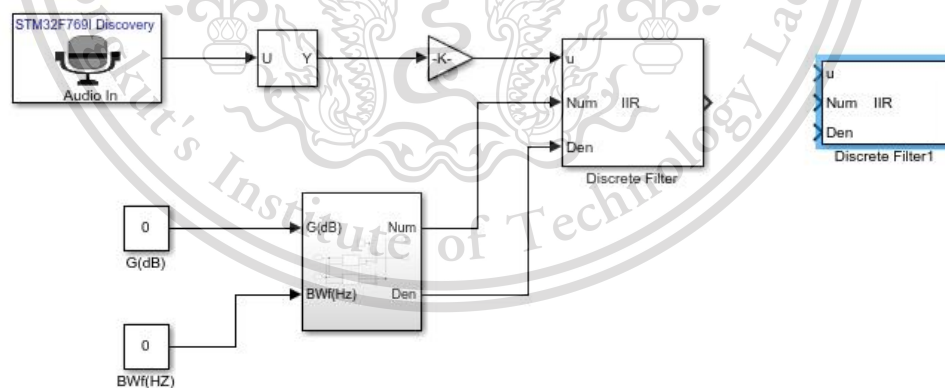
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.55 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.81



รูปที่ 5.81 ลากบล็อก Discrete Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (3)

ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.56 จากนั้นทำการกด OK จะได้ บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.82

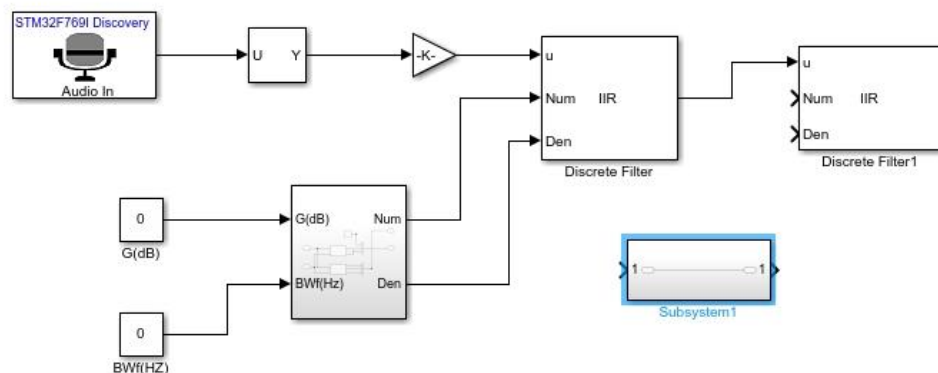


รูปที่ 5.82 บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (3)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก subsystem ดังรูปที่ 5.59 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.83

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.83 ลากบล็อก subsystem ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (2)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก subsystem จะได้อีกหน้าต่าง ดังรูปที่ 5.61 และทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก In1 ดังรูปที่ 5.62 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง subsystem จำนวน 3 บล็อก ดังรูปที่ 5.84

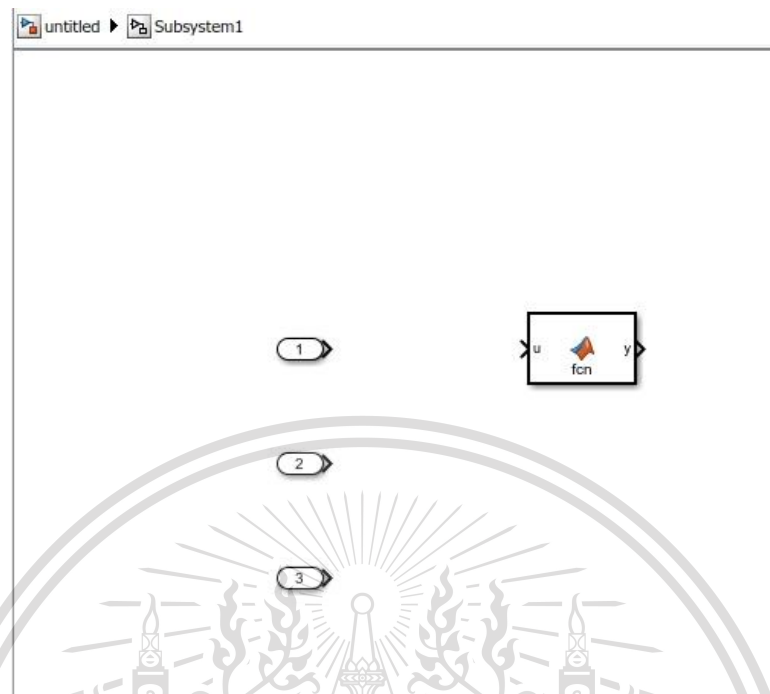
รูปที่ 5.84 ลากบล็อก In1 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า matlab function แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function ดังรูปที่ 5.64 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.85 ลากบล็อก matlab function ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (2)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่ matlab function จะปรากฏหน้าต่าง ให้เขียนคำสั่ง matlab ดังรูปที่ 5.86

```

Editor - Block: untitled/Subsystem1/MATLAB Function*
+4 Subsystem/MATLAB Function  Subsystem/MATLAB Function1  Subsystem1/f
1  function [a1,a2] = fcn(f,G,BWf)
2  -   Fs=44100;
3  -   w0=2*pi*f/Fs;
4  -   G = 10^(G/20);
5  -   BW = 2*pi*BWf/Fs;
6  -   a1 = -2*(G^0.5)*cos(w0)/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
7  -   a2 = ((G^0.5)-(tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
8

```

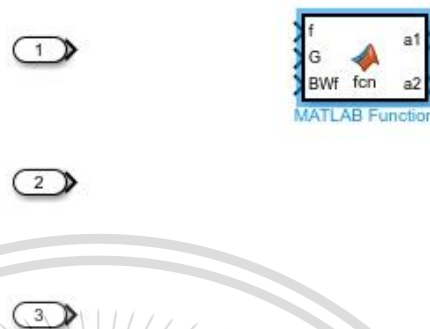
รูปที่ 5.86 คำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band1) (den)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการ run model แล้วลักษณะของบล็อก matlab function จะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 5.87



รูปที่ 5.87 matlab function ของ Peaking filter (EQ band1) เมื่อ run model แล้ว

จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า matlab function อีกครั้ง แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function แล้วทำการเขียนคำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band1) ดังรูปที่ 5.88 แล้ว run model จะได้รูปที่ 5.89

```

Editor - Block: untitled/Subsystem1/MATLAB Function1*
Subsystem1/MATLAB Function1  Subsystem1/MATLAB Function  Subsystem1/MATLAB Function1*
1  function [b0,b1,b2] = fcn(f,G,BWf)
2  -   Fs=44100;
3  -   w0=2*pi*f/Fs;
4  -   G = 10^(G/20);
5  -   BW = 2*pi*BWf/Fs;
6
7  -   b0 = ((G^0.5)+(G*tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
8  -   b1 = -2*(G^0.5)*cos(w0)/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
9  -   b2 = ((G^0.5)-(G*tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));

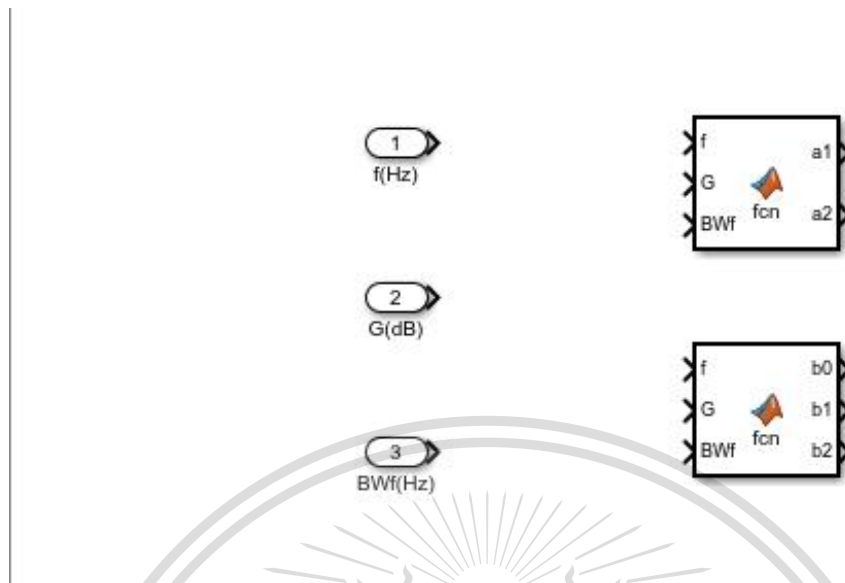
```

รูปที่ 5.88 คำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band1) (num)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

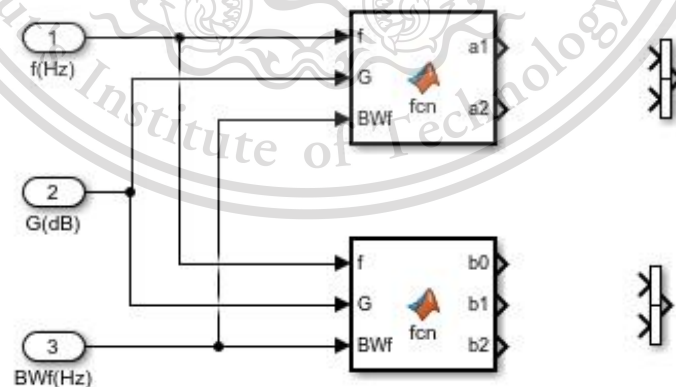
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.89 matlab function ของ Peaking filter (EQ band1) เมื่อ run model แล้ว

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate จากนั้นให้ทำการลาก บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 อัน ดังรูปที่ 5.90 และทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดค่า number of input เป็น 3 ดังรูปที่ 5.71



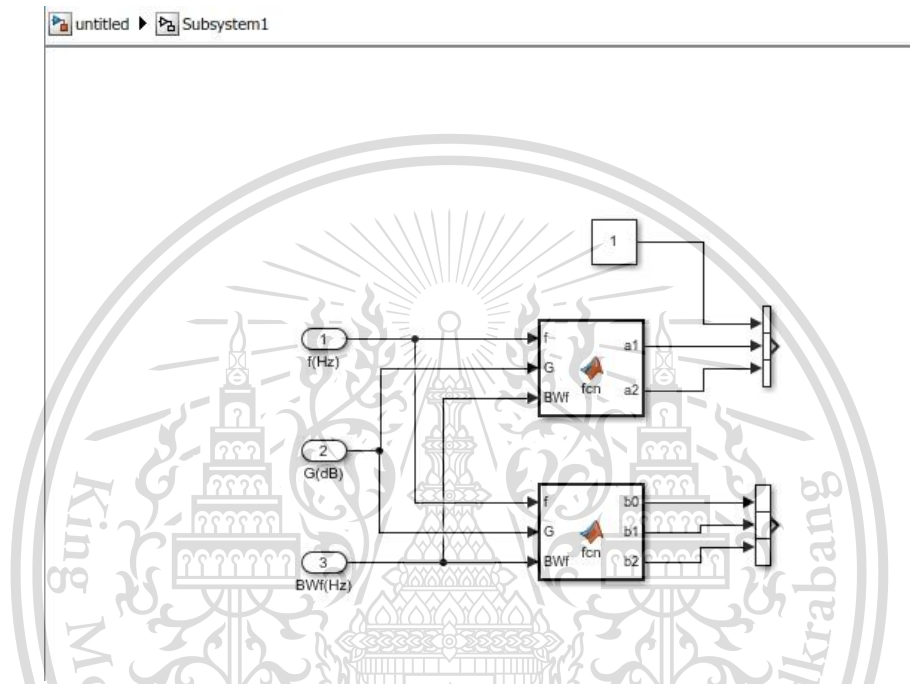
รูปที่ 5.90 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้อง  
 ช่องค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant ดังรูปที่ 5.73 จากนั้นให้ทำการลาก  
 บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก  
 Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.91



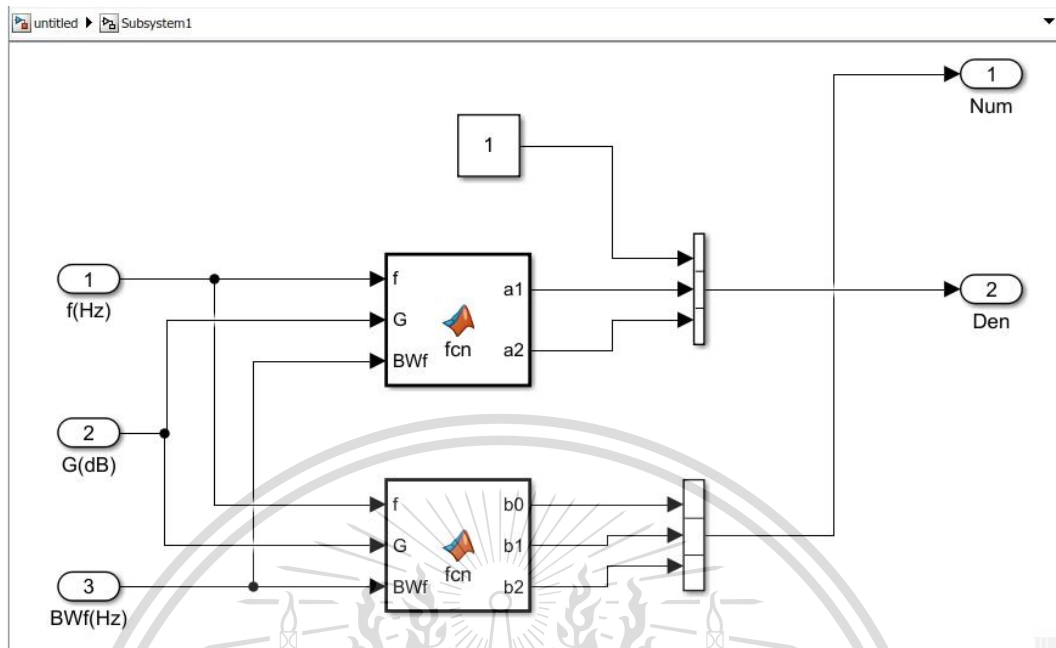
รูปที่ 5.91 ลากบล็อก constant ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง  
 ค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก Out1 ดังรูปที่ 5.75 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก  
 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Out1  
 และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.92 จะได้บล็อกการทำงานของ Peaking filter (EQ band  
 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

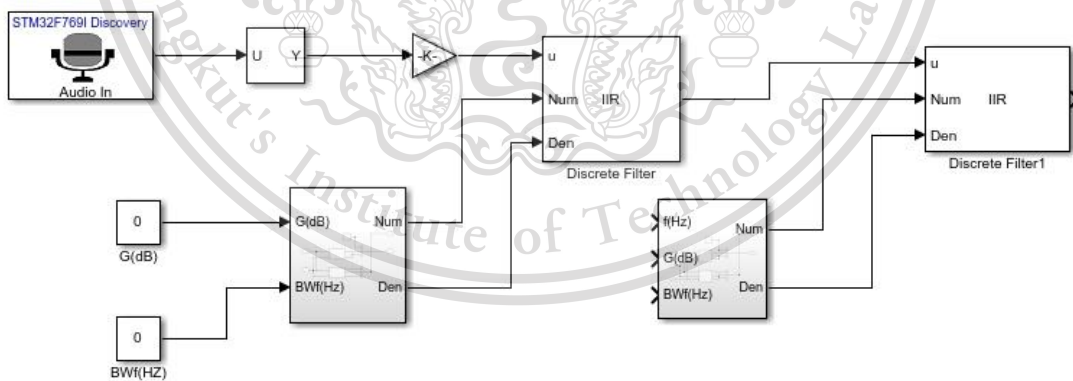
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.92 วงจรการทำงานของ Peaking filter (EQ band 1)

จากนั้นทำการกลับมาที่หน้าต่างหลักของ Simulink แล้วทำการลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter จะได้ดังรูปที่ 5.93



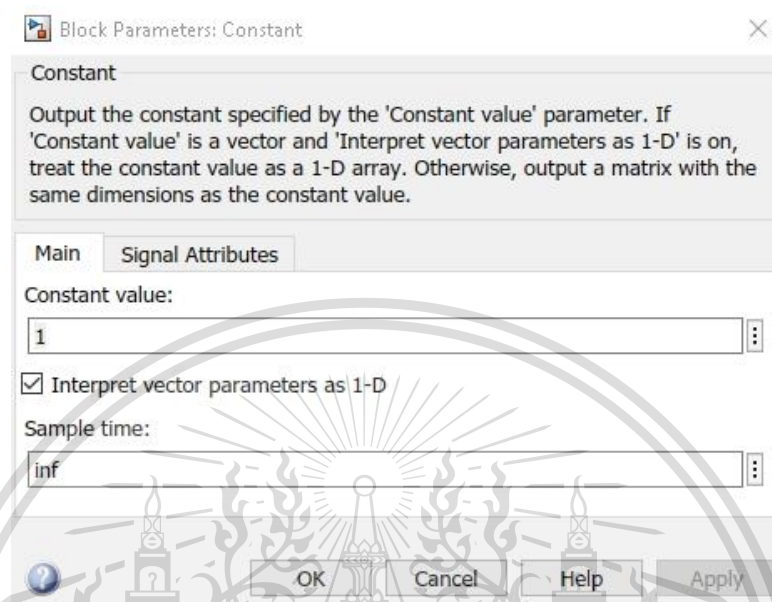
รูปที่ 5.93 ลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เนื่องมาจากเนื้อหาเป็นประโยชน์ด้านการค้า ค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวาง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

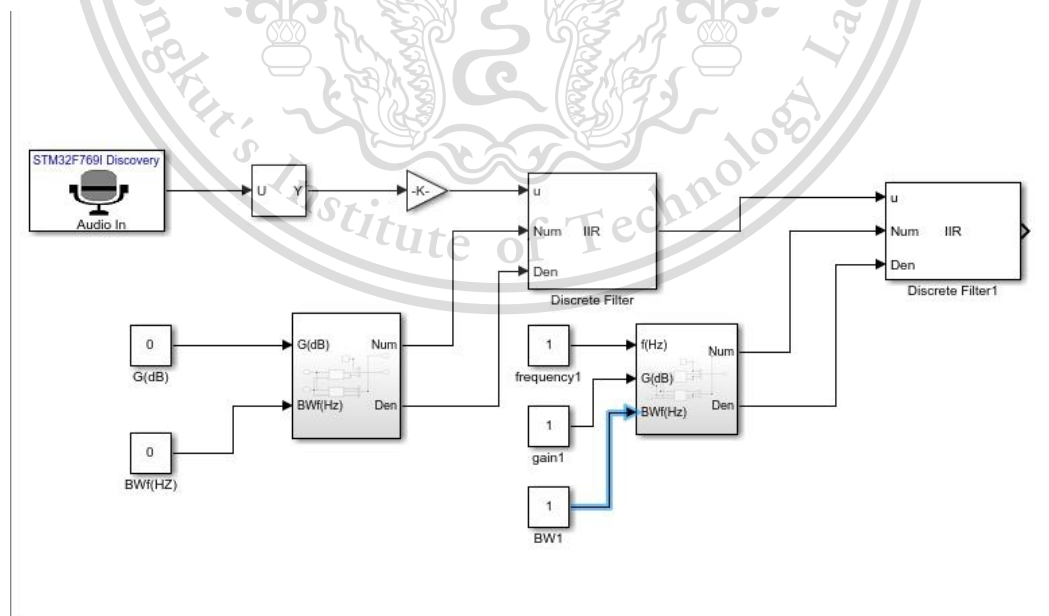
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 3 บล็อก แล้วทำการตั้งค่าบล็อก constant ทั้งสาม ดังรูปที่ 5.94



รูปที่ 5.94 การตั้งค่าบล็อก constant (2)

จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก constant และ subsystem ดังรูปที่ 5.95 จะได้วงจร Peaking filter (EQ band 1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

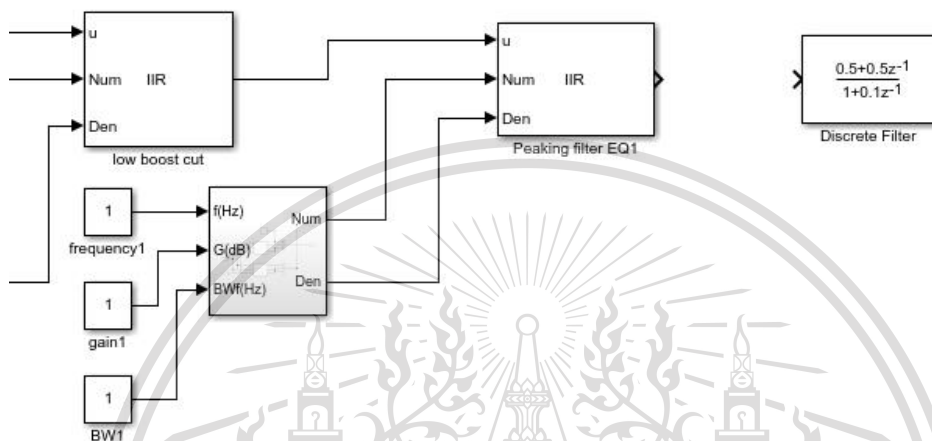
รูปที่ 5.95 วงจร Peaking filter (EQ band 1)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

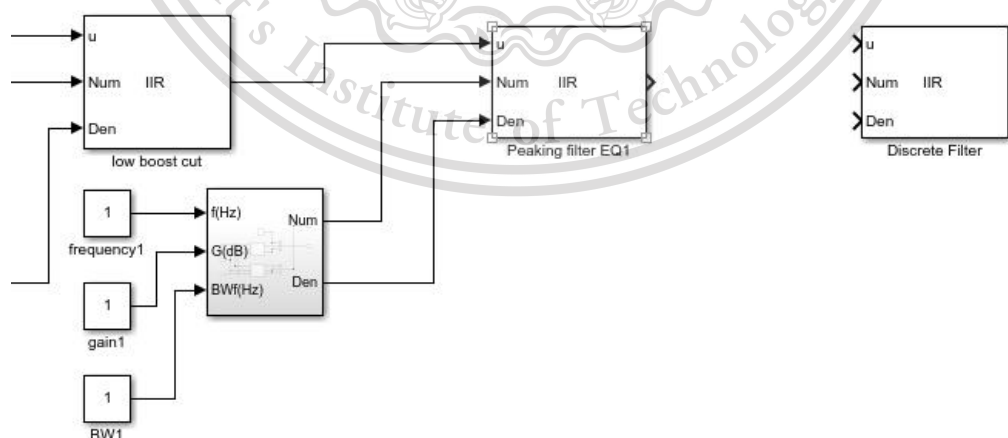
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.55 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.96



รูปที่ 5.96 ลากบล็อก Discrete Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (4)

ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.56 จากนั้นทำการกด OK จะได้บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.97



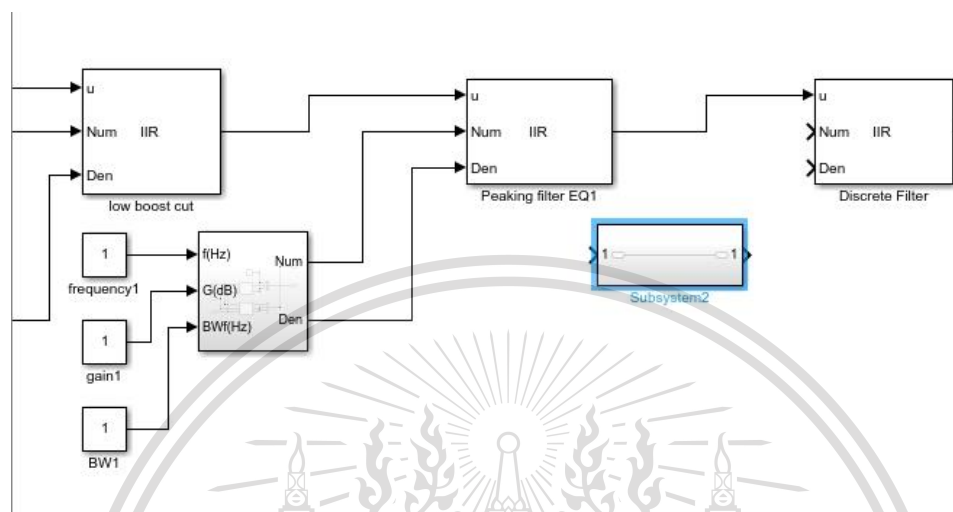
รูปที่ 5.97 บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

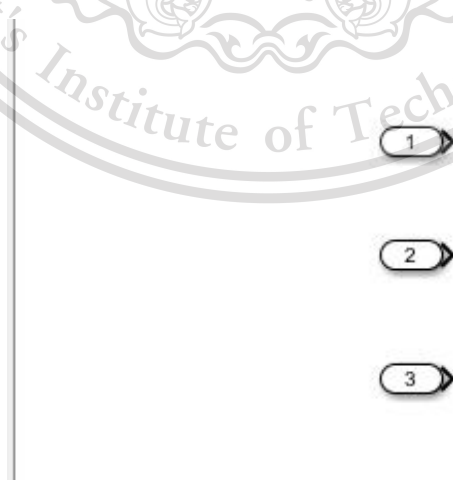
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก subsystem ดังรูปที่ 5.59 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.98



รูปที่ 5.98 ลากบล็อก subsystem ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (3)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก subsystem จะได้หน้าต่าง ดังรูปที่ 5.61 และทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก ln1 ดังรูปที่ 5.62 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง subsystem จำนวน 3 บล็อก ดังรูปที่ 5.99



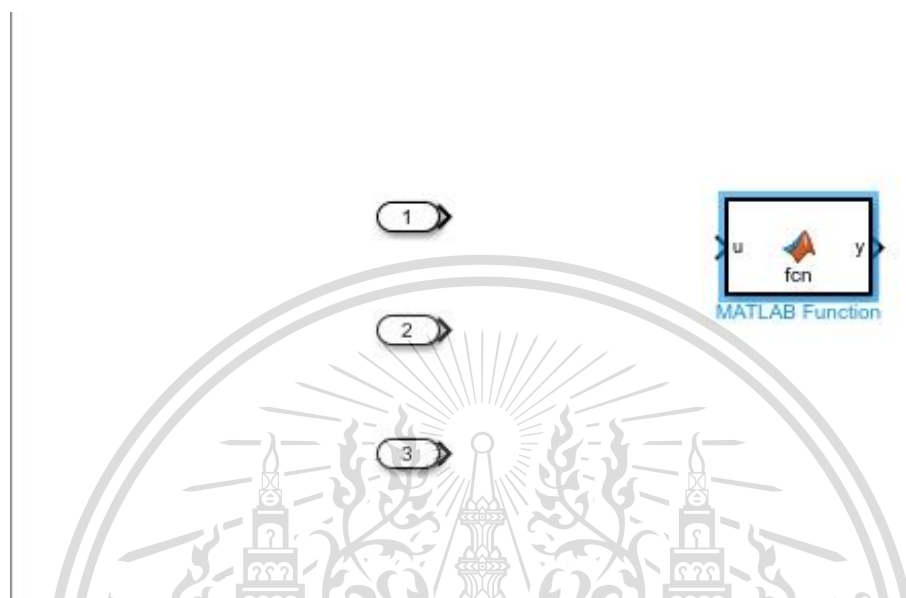
รูปที่ 5.99 ลากบล็อก ln1 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยอิสระด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า matlab function แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function ดังรูปที่ 5.64 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.100



รูปที่ 5.100 ลากบล็อก matlab function ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (3)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่ matlab function จะปรากฏหน้าต่าง ให้เขียนคำสั่ง matlab ดังรูปที่ 5.101

```

Editor - Block: untitled/Subsystem2/MATLAB Function*
LPF_2nd.m  BSF_2nd.m  BPF_2nd.m  HPPF_2nd.m  Subsystem2/MATLAB Fur
1  function [a1,a2] = fcn(f,G,BWf)
2  -   Fs=44100;
3  -   w0=2*pi*f/Fs;
4  -   G = 10^(G/20);
5  -   BW = 2*pi*BWf/Fs;
6  -   a1 = -2*(G^0.5)*cos(w0)/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
7  -   a2 = ((G^0.5)-(tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));

```

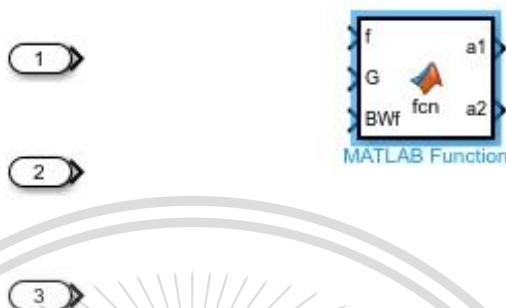
รูปที่ 5.101 คำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band 2) (den)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการ run model แล้วลักษณะของบล็อก matlab function จะเปลี่ยนไป  
ดังรูปที่ 5.102



รูปที่ 5.102 matlab function ของ Peaking filter (EQ band 2) เมื่อ run model แล้ว (3)

จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายใน  
ห้องช่องค้นหาว่า matlab function อีกครั้ง แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function แล้วทำ  
การเขียนคำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band 2) ดังรูปที่ 5.103 แล้ว run model จะได้  
รูปที่ 5.104

```

Editor - Block: untitled/Subsystem2/MATLAB Function1*
LPF_2nd.m  BSF_2nd.m  BPF_2nd.m  HPF_2nd.m  Subsystem2/MATLAB
1  function [b0,b1,b2] = fcn(f,G,BWf)
2  -
3  -   Fs=44100;
4  -   w0=2*pi*f/Fs;
5  -   G = 10^(G/20);
6  -   BW = 2*pi*BWf/Fs;
7  -   b0 = ((G^0.5)+(G*tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
8  -   b1 = -2*(G^0.5)*cos(w0)/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
9  -   b2 = ((G^0.5)-(G*tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
10

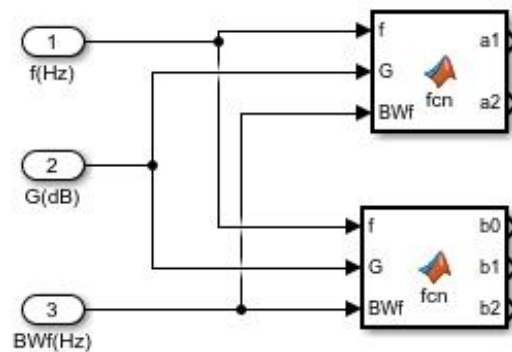
```

รูปที่ 5.103 คำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band2) (num)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

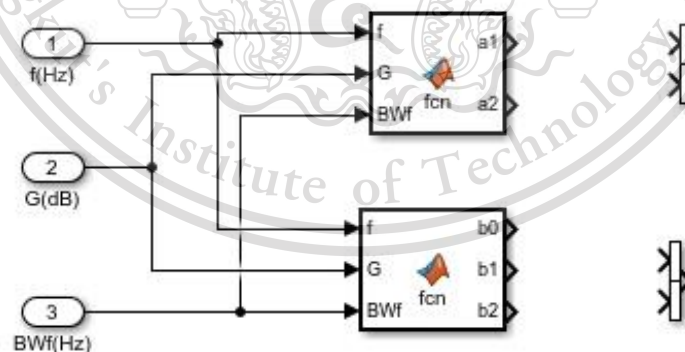
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.104 matlab function ของ Peaking filter (EQ band2) เมื่อ run model แล้ว

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate จากนั้นให้ทำการลาก บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 อัน ดังรูปที่ 5.105 และทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดค่า number of input เป็น 3 ดังรูปที่ 5.71



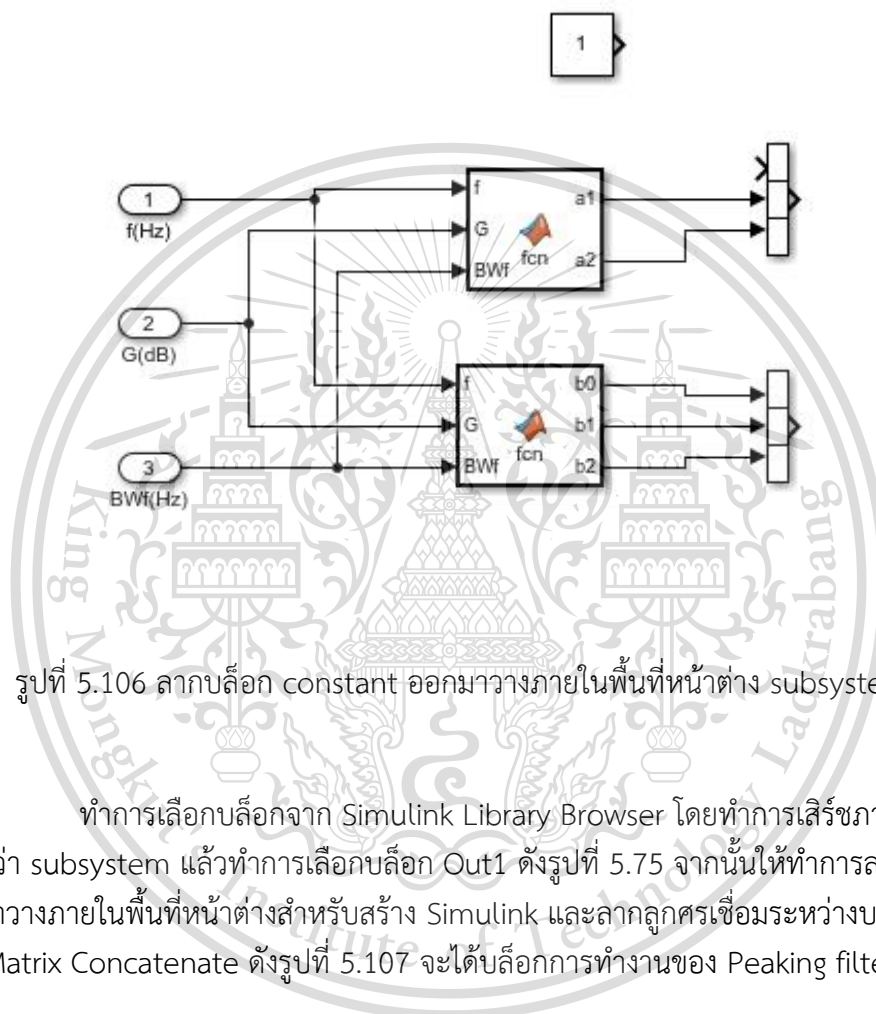
รูปที่ 5.105 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

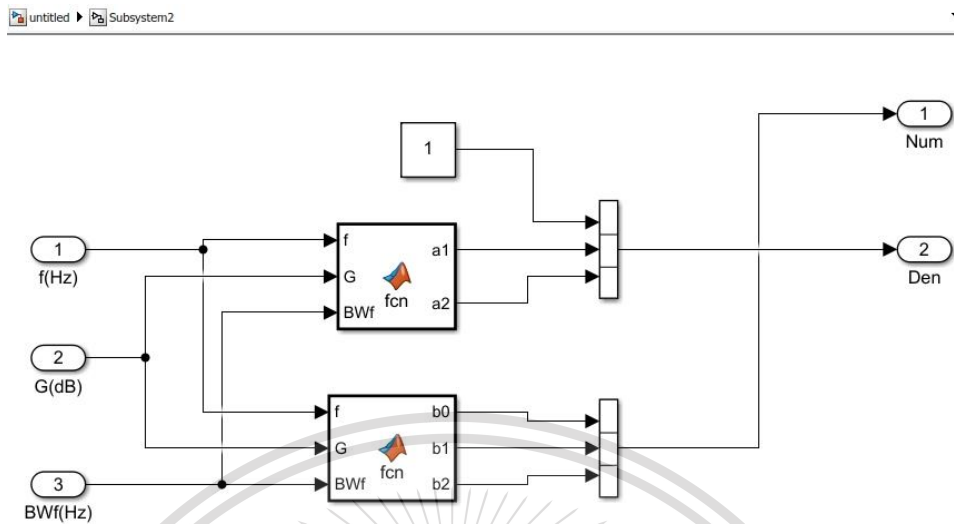
ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้อง  
 ช่องค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant ดังรูปที่ 5.73 จากนั้นให้ทำการลาก  
 บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก  
 Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

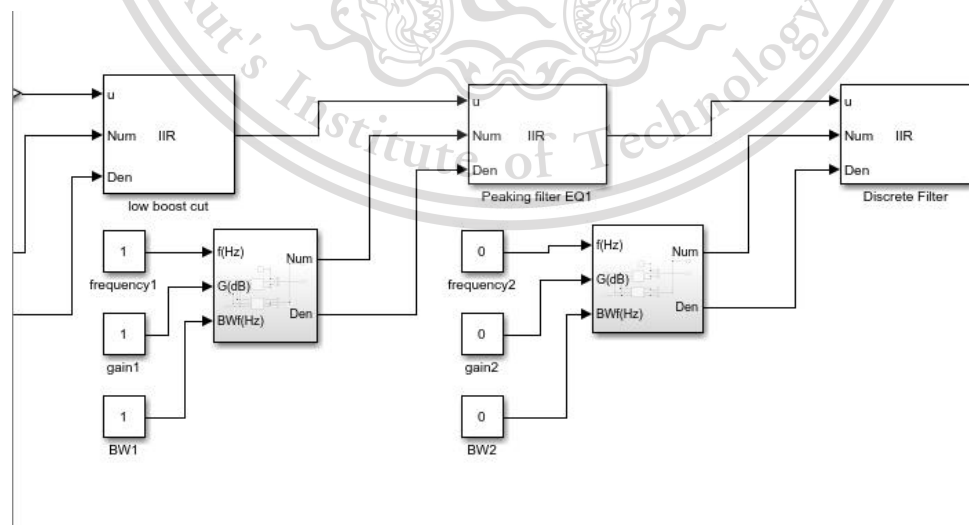
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.107 วงจรการทำงานของ Peaking filter (EQ band 2)

จากนั้นทำการกลับมาที่หน้าต่างหลักของ Simulink ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 3 บล็อก แล้วทำการตั้งค่าบล็อก constant ทั้งสาม ดังรูปที่ 5.94

แล้วทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก constant และ subsystem ดังรูปที่ 5.108 จะได้วงจร Peaking filter (EQ band 2)



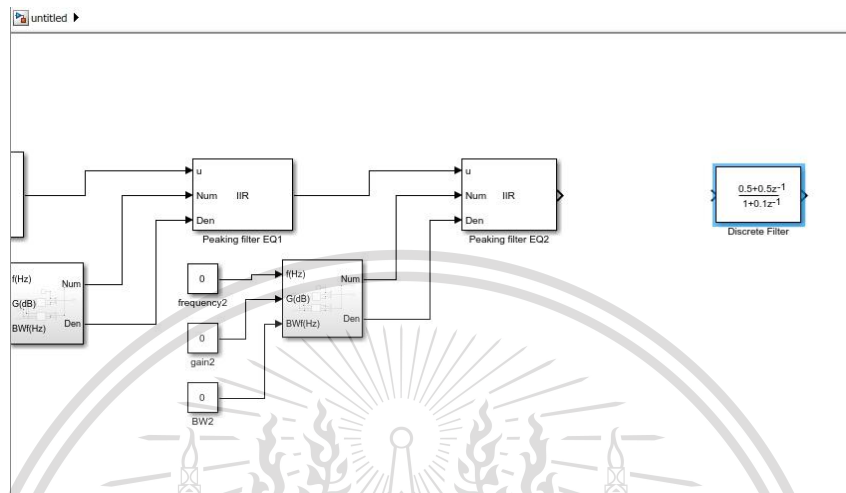
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5.108 วงจร Peaking filter (EQ band 2) ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

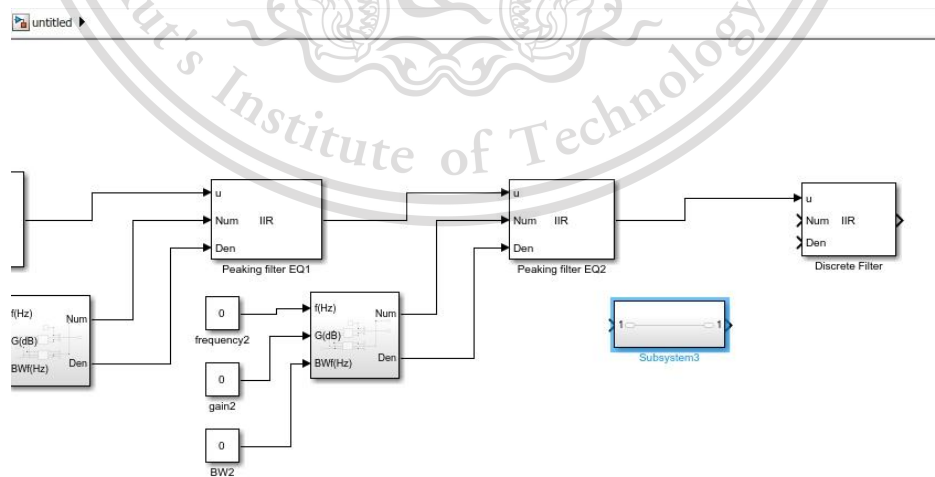
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.55 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.109



รูปที่ 5.109 ลากบล็อก Discrete Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (5)

ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.156 จากนั้นทำการกด OK จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก subsystem ดังรูปที่ 5.59 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.110



รูปที่ 5.110 ลากบล็อก subsystem ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในแวดวงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นใบแจ้งประสงค์ขอใช้งานการคัดลอกไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก subsystem จะได้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 5.61 และทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก In1 ดังรูปที่ 5.62 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง subsystem จำนวน 3 บล็อก ดังรูปที่ 5.111



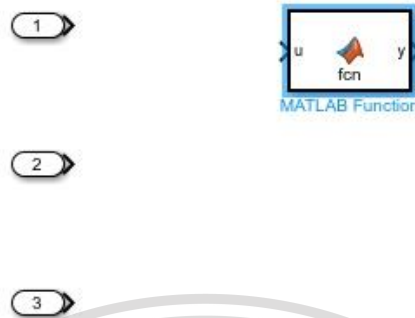
รูปที่ 5.111 ลากบล็อก In1 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (4)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า matlab function แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function ดังรูปที่ 5.64 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.112 ลากบล็อก matlab function ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (4)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่ matlab function จะปรากฏหน้าต่าง ให้เขียนคำสั่ง matlab ดังรูปที่ 5.113

```

Editor - Block: untitled/Subsystem3/MATLAB Function*
+2 BPF_2nd.m HPF_2nd.m Subsystem3/MATLAB Function* Subsystem
1 function [a1,a2] = fcn(f,G,BWf)
2     Fs=44100;
3     w0=2*pi*f/Fs;
4     G = 10^(G/20);
5     BW = 2*pi*BWf/Fs;
6     a1 = -2*(G^0.5)*cos(w0)/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
7     a2 = ((G^0.5)-(tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
8

```

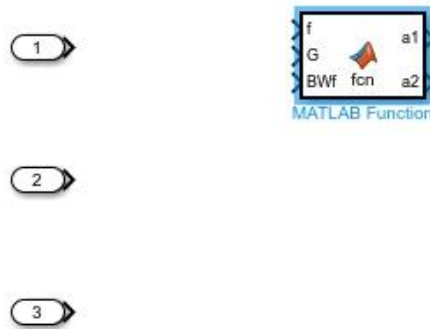
รูปที่ 5.113 คำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band3) (den)

จากนั้นทำการ run model แล้วลักษณะของบล็อก matlab function จะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 5.114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.114 matlab function ของ Peaking filter (EQ band3) เมื่อ run model แล้ว (4)

จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า matlab function อีกครั้ง แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function แล้วทำการเขียนคำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band3) ดังรูปที่ 5.115 แล้ว run model จะได้รูปที่ 5.116

```

Editor - Block: untitled/Subsystem3/MATLAB Function1*
+2 BPF_2nd.m  HPF_2nd.m  Subsystem3/MATLAB Function1*  Subsystem2/MATLAB Function4
1  function [b0,b1,b2] = fcn(f,G,BWf)
2  -   Fs=44100;
3  -   w0=2*pi*f/Fs;
4  -   G = 10^(G/20);
5  -   BW = 2*pi*BWf/Fs;
6
7  -   b0 = ((G^0.5)+(G*tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
8  -   b1 = -2*(G^0.5)*cos(w0)/((G^0.5)+(tan(BW/2)));
9  -   b2 = ((G^0.5)-(G*tan(BW/2)))/((G^0.5)+(tan(BW/2)));

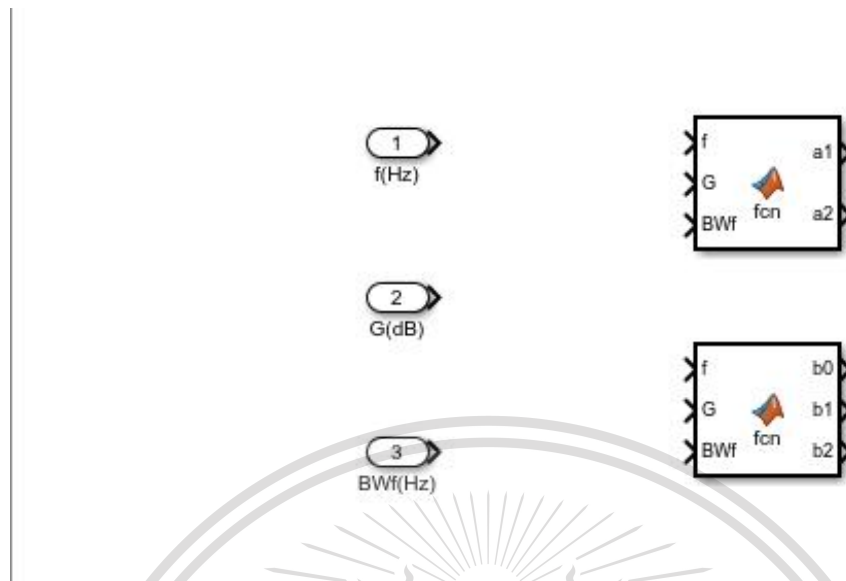
```

รูปที่ 5.115 คำสั่ง matlab ของ Peaking filter (EQ band3) (num)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

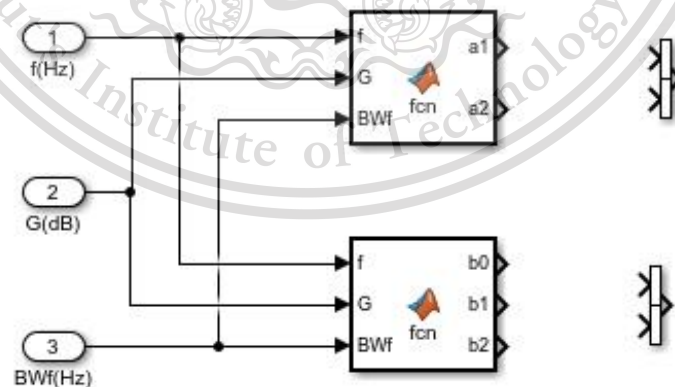
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.116 matlab function ของ Peaking filter (EQ band3) เมื่อ run model แล้ว (5)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate จากนั้นให้ทำการลาก บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 อัน ดังรูปที่ 5.117 และทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดค่า number of input เป็น 3 ดังรูปที่ 5.71



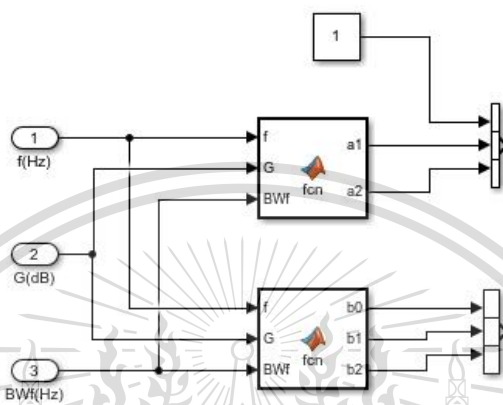
รูปที่ 5.117 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างต่าง subsystem (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

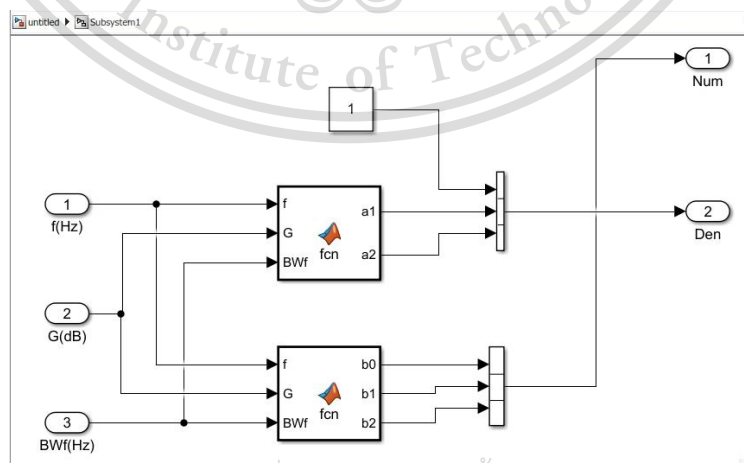
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้อง  
 ช่องค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant ดังรูปที่ 5.173 จากนั้นให้ทำการลาก  
 บล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก  
 Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.118



รูปที่ 5.118 ลากบล็อก constant ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (4)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง  
 ค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก Out1 ดังรูปที่ 5.75 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก  
 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก  
 Out1 และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.119 จะได้บล็อกการทำงานของ Peaking filter (EQ band  
 3)

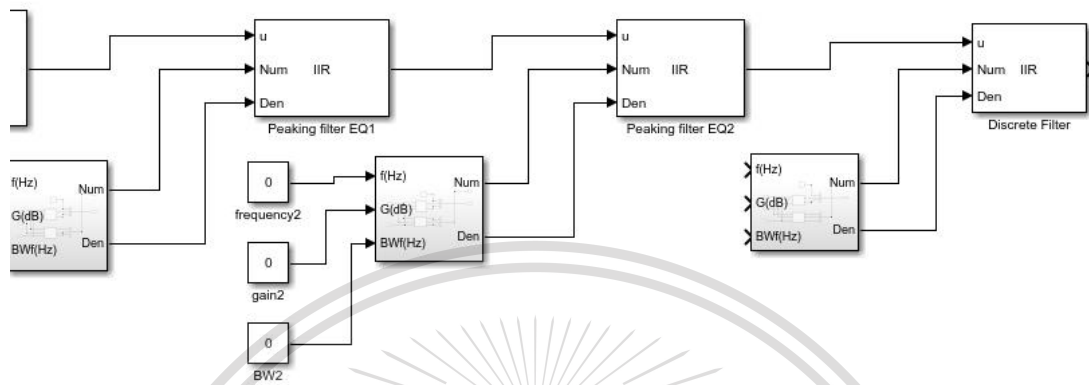


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 5.119 วงจรการทำงานของ Peaking filter (EQ band 3)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

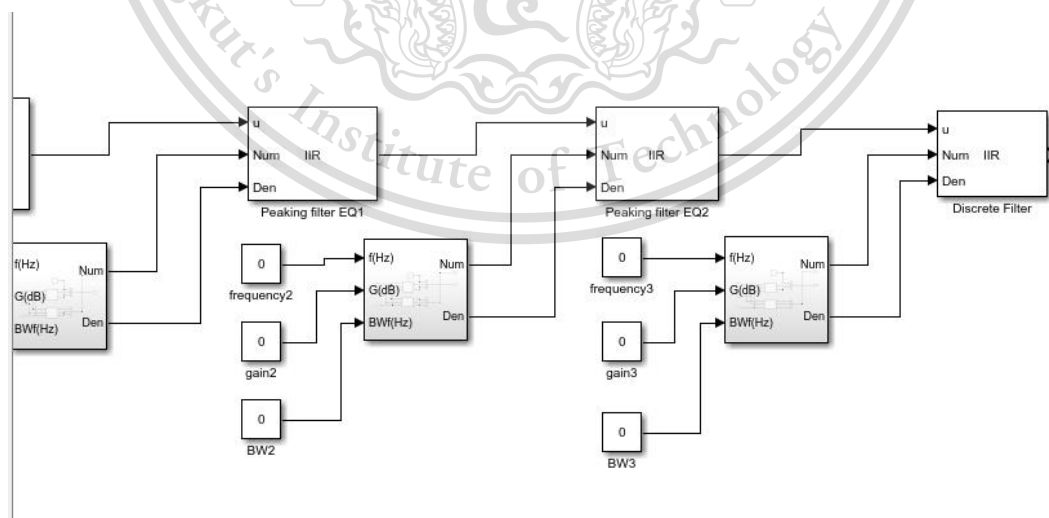
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการกลับมาที่หน้าต่างหลักของ Simulink แล้วทำการลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter จะได้ดังรูปที่ 5.120



รูปที่ 5.120 ลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter (4)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเลิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 3 บล็อก แล้วทำการตั้งค่าบล็อก constant ทั้งสาม ดังรูปที่ 5.79 จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมระหว่างบล็อก constant และ subsystem ดังรูปที่ 5.121 จะได้วงจร Peaking filter (EQ band 3)



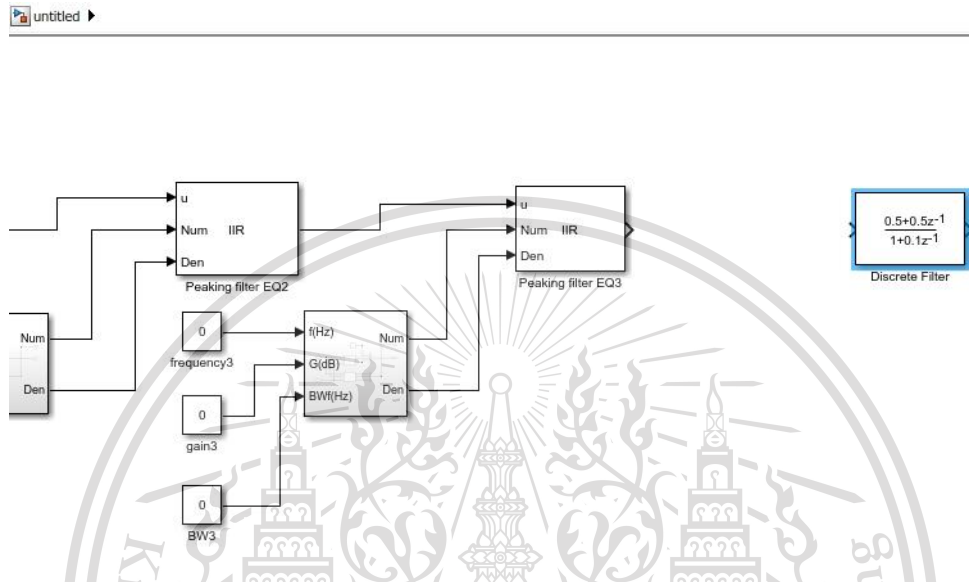
รูปที่ 5.121 วงจร Peaking filter (EQ band 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

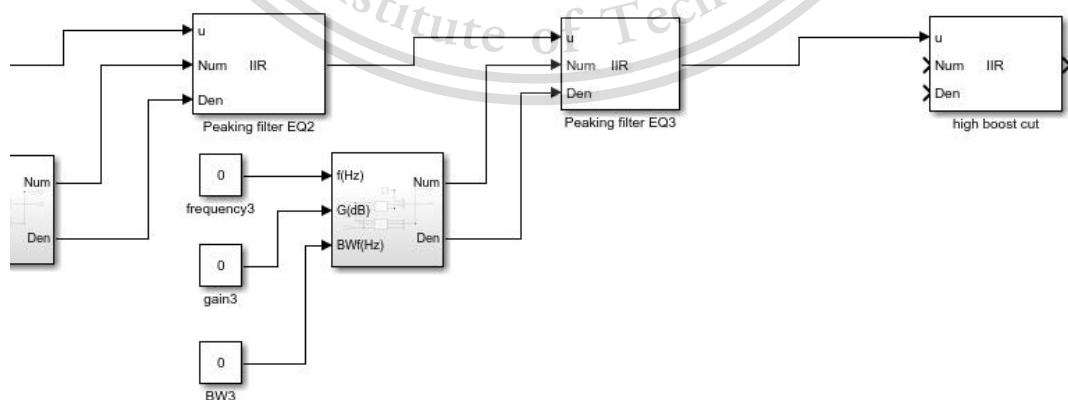
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้อง  
 ช่องค้นหาว่า Discrete Filter แล้วทำการเลือกบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.55 จากนั้นให้ทำ  
 การลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่าง  
 บล็อก Gain และ Discrete Filter ดังรูปที่ 5.122



รูปที่ 5.122 ลากบล็อก Discrete Filter ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink  
 และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Discrete Filter (6)

ทำการตั้งค่าบล็อก Discrete Filter ดังรูปที่ 5.56 จากนั้นทำการกด OK จะได้  
 บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.123



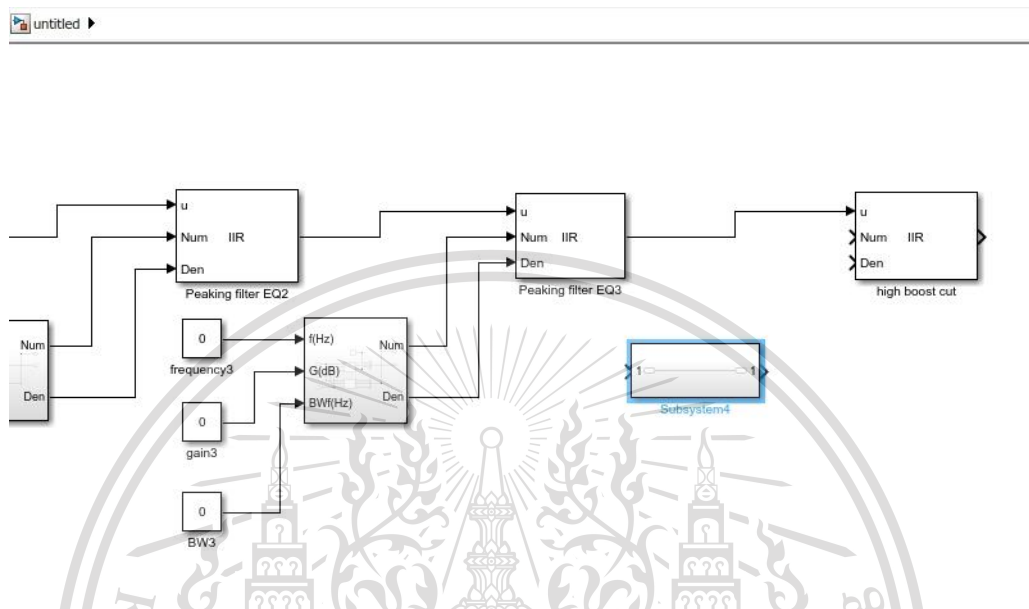
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในองค์กรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 5.123 บล็อก Discrete Filter ที่มีลักษณะเปลี่ยนไป (5)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก subsystem ดังรูปที่ 5.59 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.124



รูปที่ 5.124 ลากบล็อก subsystem ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (5)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก subsystem จะได้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 5.61 และทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก In1 ดังรูปที่ 5.62 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.125

รูปที่ 5.125 ลากบล็อก In1 ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า matlab function แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function ดังรูปที่ 5.64 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.126



รูปที่ 5.126 ลากบล็อก matlab function ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (5)

จากนั้นเมื่อทำการดับเบิลคลิกที่ matlab function จะปรากฏหน้าต่าง ให้เขียนคำสั่ง matlab ดังรูปที่ 5.127

```

Editor - Block: untitled/Subsystem4/MATLAB Function*
LPF_2nd.m x BSF_2nd.m x BPF_2nd.m x HPF_2nd.m x Subsystem4/MATLAB Function* x +
1 function [a1,a2] = fcn(GdB,BWf)
2     Fs=44100;
3     G=10^(GdB/20);
4     % f=(Fs/2)-BWf;
5     wc=2*pi*BWf/Fs;
6     K = tan(wc/2);
7     a1 = ((2*(K^2)*(G^0.5))-2)/((G^0.5)*(K^2)+(2^0.5)*(G^0.25)*K+1);
8     a2 = ((G^0.5)*(K^2)-(2^0.5)*(G^0.25)*K+1)/((G^0.5)*(K^2)+(2^0.5)*(G^0.25)*K+1);

```

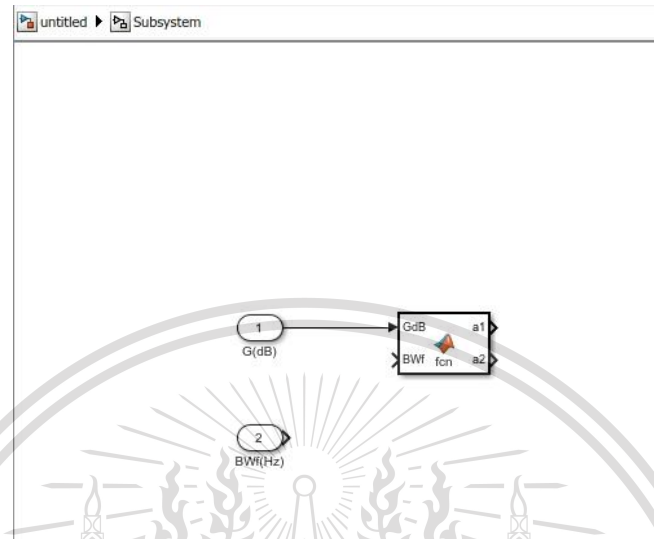
รูปที่ 5.127 คำสั่ง matlab ของ high boost cut (den)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการ run model แล้วลักษณะของบล็อก matlab function จะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 5.128



รูปที่ 5.128 matlab function ของ high boost cut (den) เมื่อ run model แล้ว (1)

จากนั้นทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า matlab function อีกครั้ง แล้วทำการเลือกบล็อก matlab function แล้วทำการเขียนคำสั่ง matlab ของ low boost cut (num) ดังรูปที่ 5.129 แล้ว run model จะได้รูปที่ 5.130

```

Editor - Block: untitled/Subsystem4/MATLAB Function1*
LPF_2nd.m  BSF_2nd.m  BPF_2nd.m  HPF_2nd.m  Subsystem4/MATLAB Function1*
1  function [b0,b1,b2] = fcn(GdB,BWf)
2  -
3  -   Fs=44100;
4  -   G=10^(GdB/20);
5  -   % f=(Fs/2)-BWf;
6  -   wc=2*pi*BWf/Fs;
7  -   K = tan(wc/2);
8  -   b0 = (G^0.5)*(G^0.5+(2^0.5)*(G^0.25)*K+K^2)/((G^0.5)*(K^2)+(2^0.5)*(G^0.25)*K+1);
9  -   b1 = (G^0.5)*((2*K^2)-2*G^0.5)/((G^0.5)*(K^2)+(2^0.5)*(G^0.25)*K+1);
10 -   b2 = (G^0.5)*(G^0.5-(2^0.5)*(G^0.25)*K+K^2)/((G^0.5)*(K^2)+(2^0.5)*(G^0.25)*K+1);

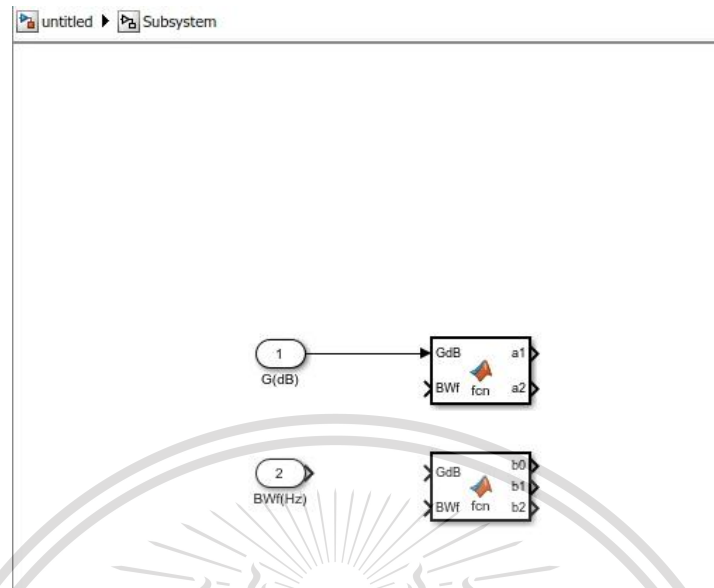
```

รูปที่ 5.129 คำสั่ง matlab ของ high boost cut (num)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

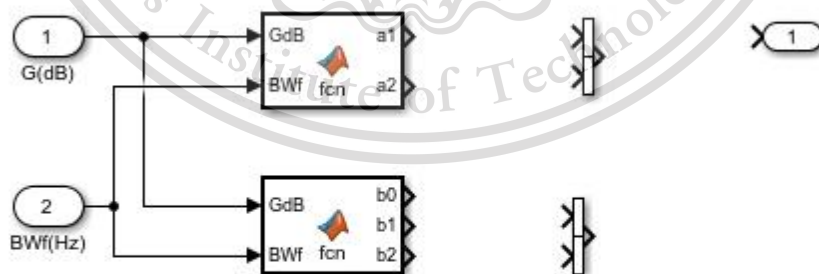
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.130 matlab function ของhigh boost cut (num) เมื่อ run model แล้ว (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 อัน ดังรูปที่ 5.131 และทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดค่า number of input เป็น 3 ดังรูปที่ 5.71



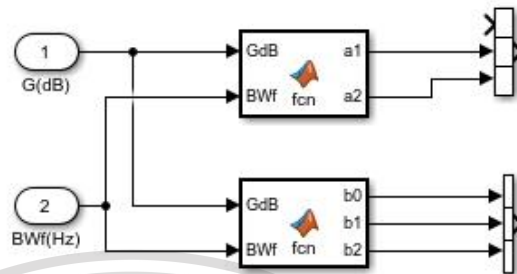
รูปที่ 5.131 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาจากหน้าต่าง subsystem (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

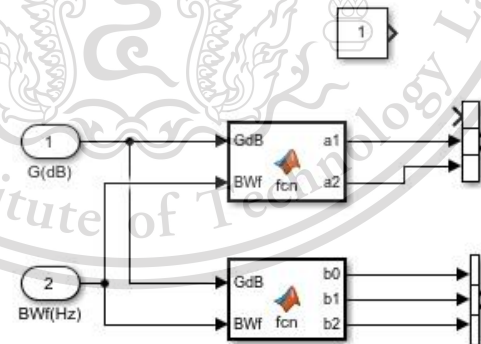
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการเชื่อมต่อ Matrix Concatenate กับ Matlab function ดังรูปที่ 5.132



รูปที่ 5.132 เชื่อมต่อ Matrix Concatenate กับ Matlab function ใน subsystem (2)

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant ดังรูปที่ 5.73 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.133



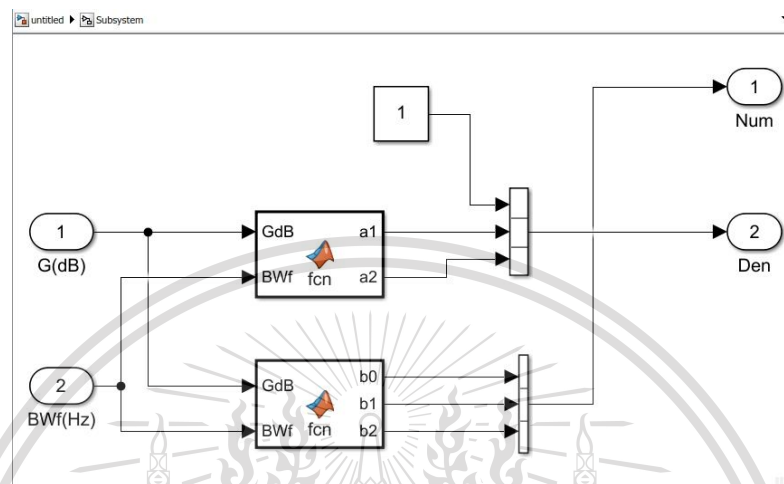
รูปที่ 5.133 ลากบล็อก constant ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่าง subsystem (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ค้นหาว่า subsystem แล้วทำการเลือกบล็อก Out1 ดังรูปที่ 5.75 จากนั้นให้ทำการลากบล็อก ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

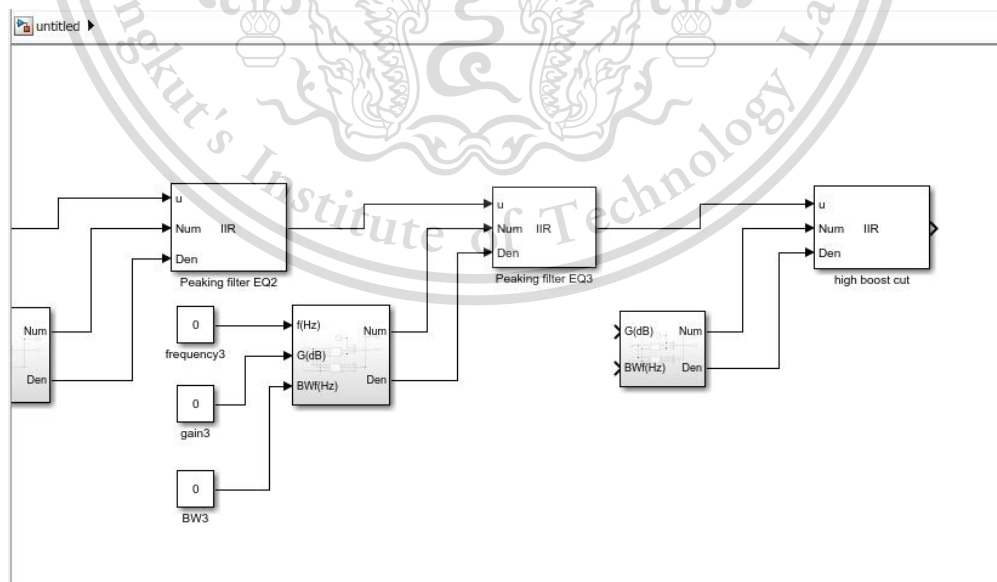
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Out1 และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.134 จะได้บล็อกการทำงานของ high boost cut



รูปที่ 5.134 วงจรการทำงานของ high boost cut

จากนั้นทำการกลับมาที่หน้าต่างหลักของ Simulink แล้วทำการลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter จะได้ดังรูปที่ 5.135



รูปที่ 5.135 ลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อก subsystem และ Discrete filter (5)

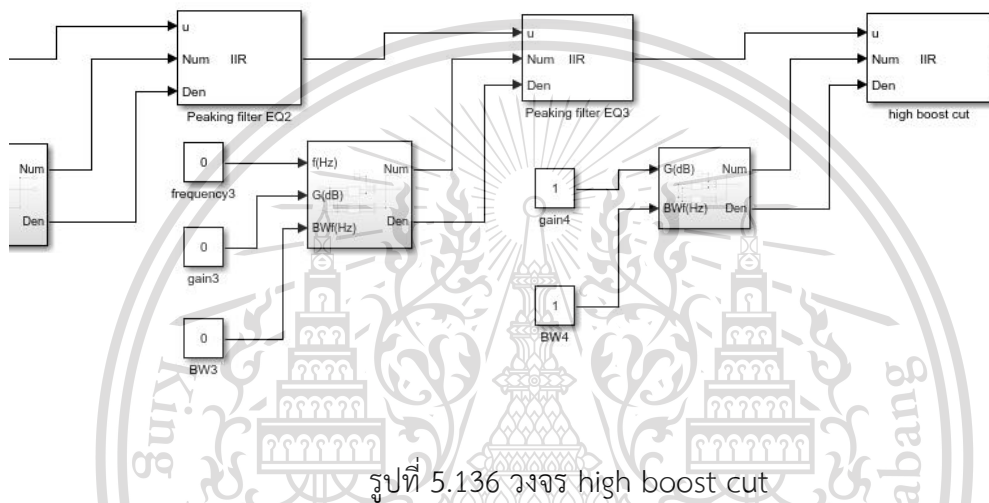
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Constant แล้วทำการเลือกบล็อก Constant จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวาง ภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink จำนวน 2 บล็อก จากนั้นทำการลากเส้นเชื่อมระหว่าง บล็อก constant และ subsystem ดังรูปที่ 5.136 จะได้วงจร high boost cut

untitled ▾

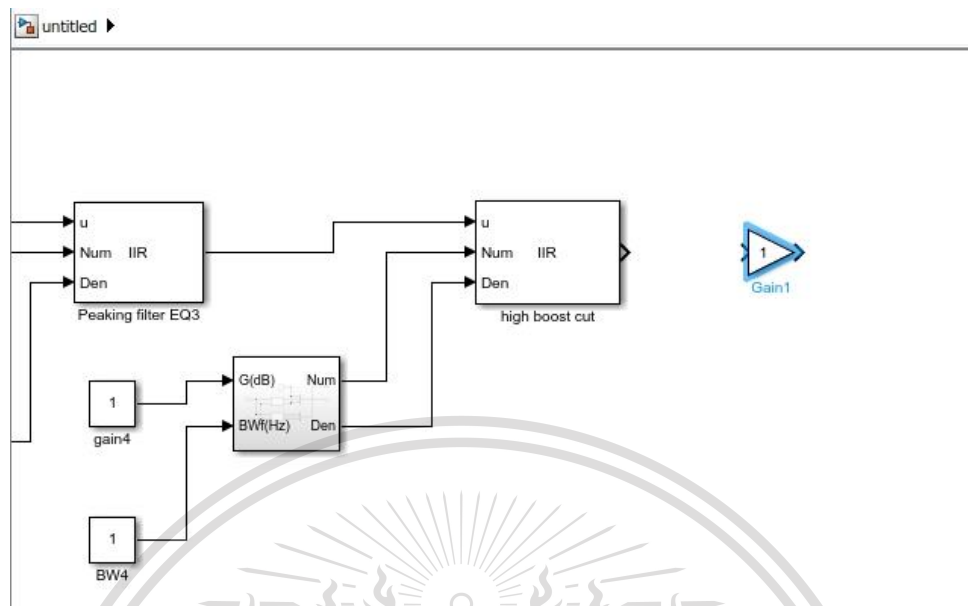


ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Gain แล้วทำการเลือกบล็อก Gain ดังรูปที่ 5.10 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวาง ภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink ดังรูปที่ 5.137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

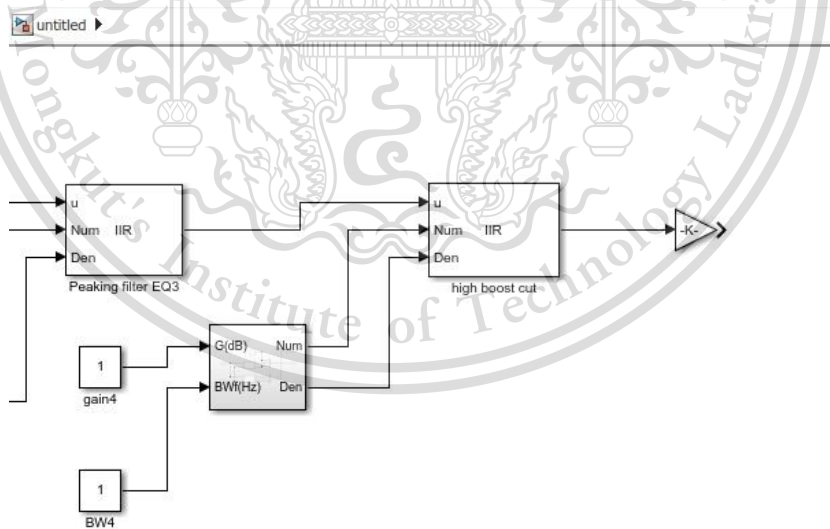
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.137 ลากบล็อก Gain ออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink (4)

จากนั้นทำการตั้งค่า gain โดยกำหนดให้ gain มีค่าเป็น 1/32,768 และ Multiplication เป็น Element-wise(K.\*u) ดังรูปที่ 5.29 และ 5.30 ตามลำดับ ทำการลากบล็อก gain เพื่อทำการเชื่อมต่อกับวงจรได้ดังรูปที่ 5.138



รูปที่ 5.139 เชื่อมต่อบล็อก gain กับวงจร

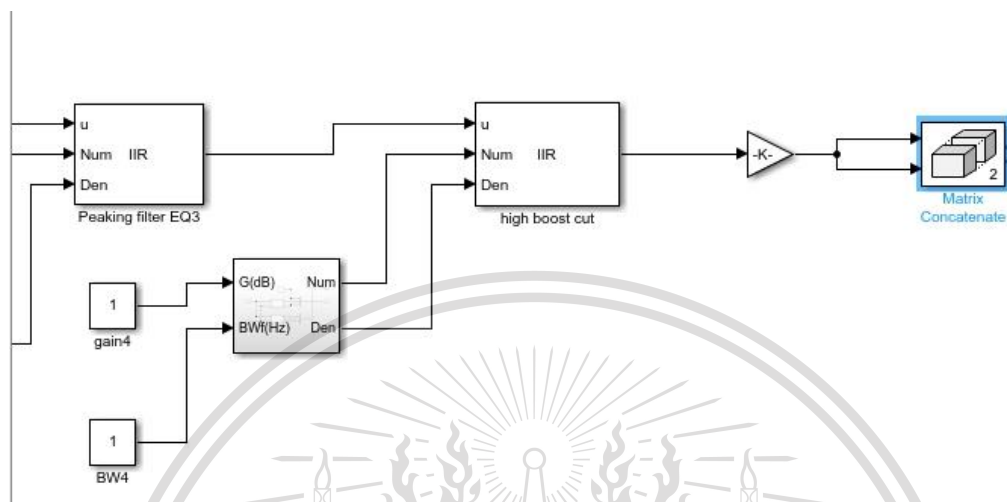
ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Concatenate แล้วทำการเลือกบล็อก Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.31 จากนั้นให้ทำการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.140



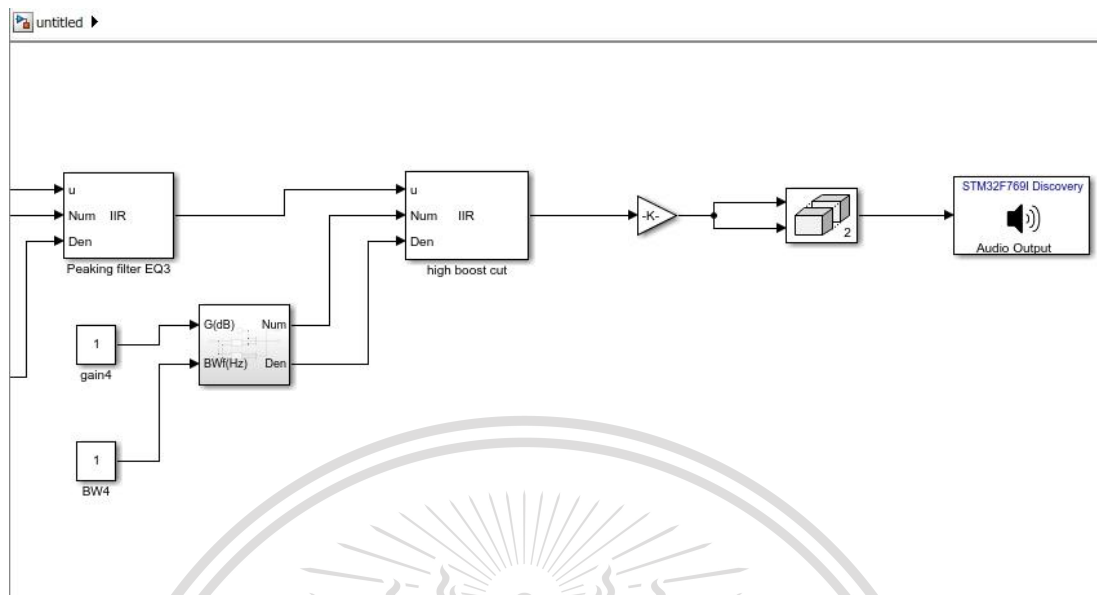
รูปที่ 5.140 ลากบล็อก Matrix Concatenate ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate (2)

ทำการตั้งค่าบล็อก Matrix Concatenate โดยกำหนดให้ Number of inputs เป็น 2, Mode เป็น Multidimensional array และ Matrix concatenate เป็น 2 แล้วทำการเลือกบล็อกจาก Audio Output โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่องค้นหาว่า Audio Output แล้วทำการเลือกบล็อก Audio Output ดังรูปที่ 5.33 จากนั้นให้ทำการลากบล็อกออกมาวางภายในพื้นที่หน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Gain และ Matrix Concatenate ดังรูปที่ 5.141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

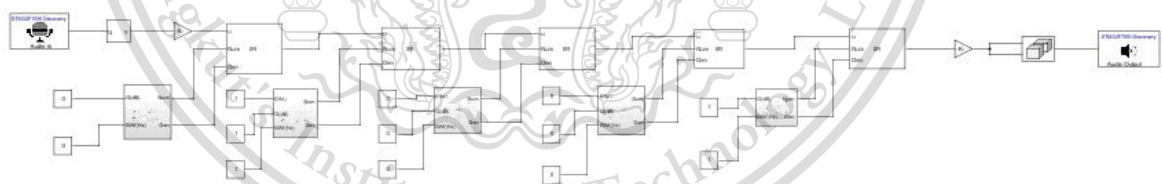
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.141 ลากบล็อก Audio Output ออกมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้าง Simulink และลากลูกศรเชื่อมระหว่างบล็อก Matrix Concatenate และ Audio Output

ทำการตั้งค่าบล็อก Audio Output โดยกำหนดให้ Sampling Frequency เป็น 16,000 Hz, Device เป็น Headphone และ Volume เป็น 63 ดังรูปที่ 5.35 จะได้วงจร Parametric Equalize ดังรูปที่ 5.142



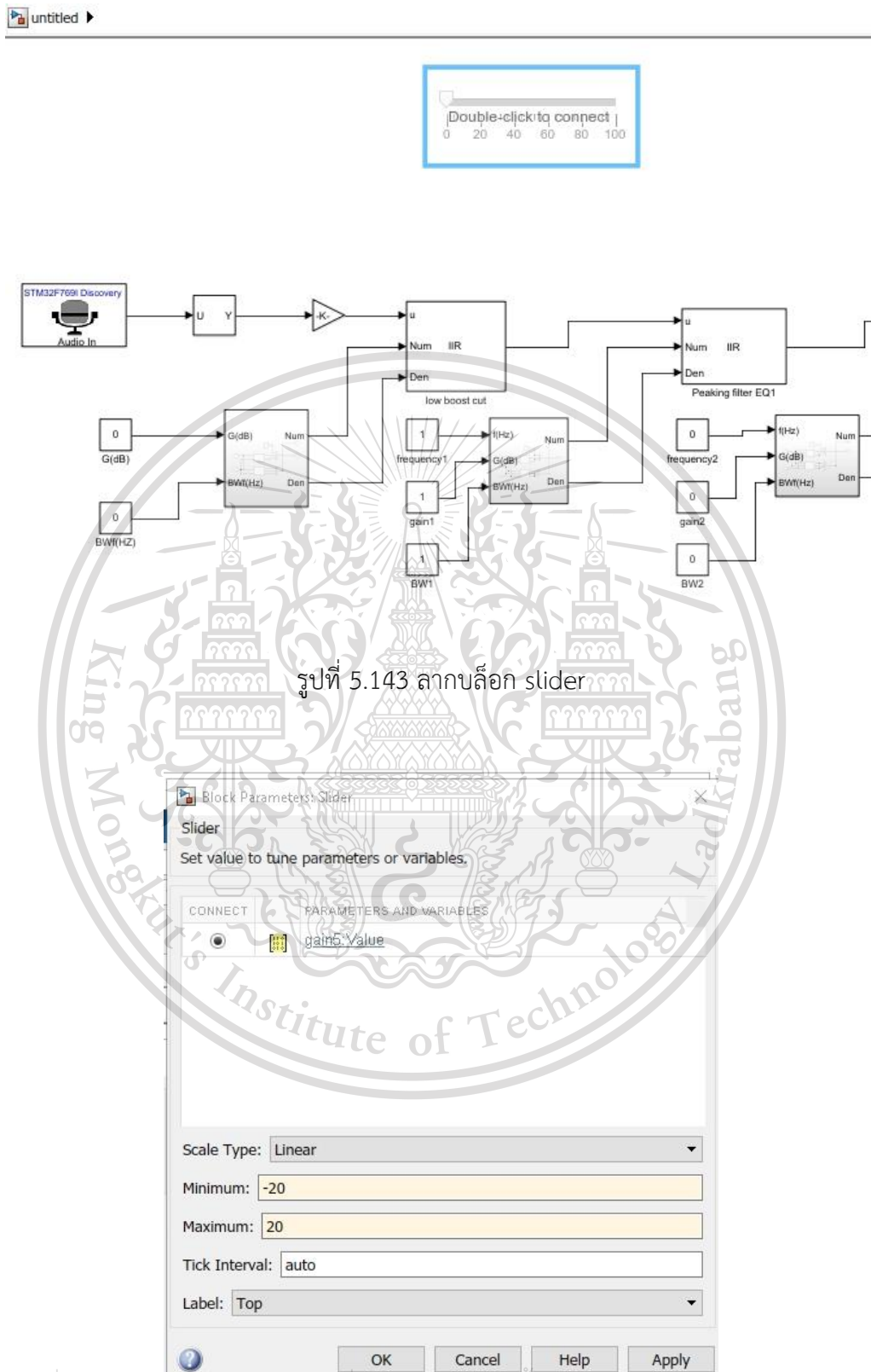
รูปที่ 5.142 วงจร Parametric Equalize

ทำการเลือกบล็อกจาก Simulink Library Browser โดยทำการเสิร์ชภายในห้องช่อง ค้นหาว่า Slider แล้วทำการเลือก Slider ดังรูปที่ 5.36 จากนั้นทำการลาก Slider ออกมาวางในพื้นที่หน้าต่าง แล้วทำการตั้งค่า Slider ดังรูปที่ 5.143 และ 5.144 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.143 ลากบล็อก slider

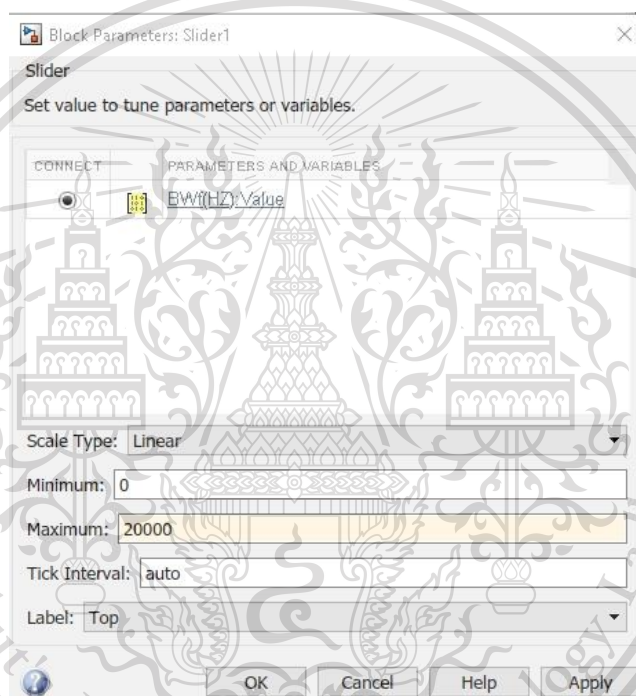
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 144 การตั้งค่า Slider และเชื่อมต่อกับ gain5:Value  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 5.144 เป็นการเชื่อมต่อ slider เพื่อให้สามารถปรับค่าแบบ External mode ได้ โดยการเข้าไปที่การตั้งค่าของ Slider จากนั้นทำการคลิกบล็อกที่เราต้องการเชื่อมต่อจากนั้นในหน้าต่างการตั้งค่า Slider จะปรากฏชื่อของบล็อกนั้นขึ้นมา เช่นในรูปที่ 5.144 ทำการเชื่อมต่อกับบล็อกที่มีชื่อว่า gain5:Value จากนั้นทำการปรับค่า min และ max เป็น -20 และ 20 ตามลำดับ

จากนั้นทำการลาก slider ออกมาอีกบล็อก โดยตั้งค่าให้ min และ max เป็น 0 และ 20,000 และทำการเชื่อมต่อกับบล็อก constant ที่มีชื่อว่า BWf(Hz):Value ดังรูปที่ 5.145



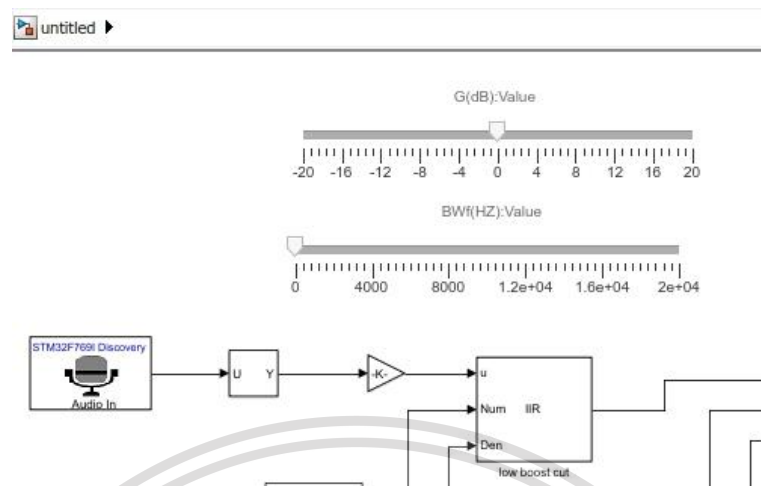
รูปที่ 5.145 การตั้งค่า Slider และเชื่อมต่อกับ BWf(Hz):Value

จากนั้นจะได้ slider ออกมาดังรูปที่ 5.146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

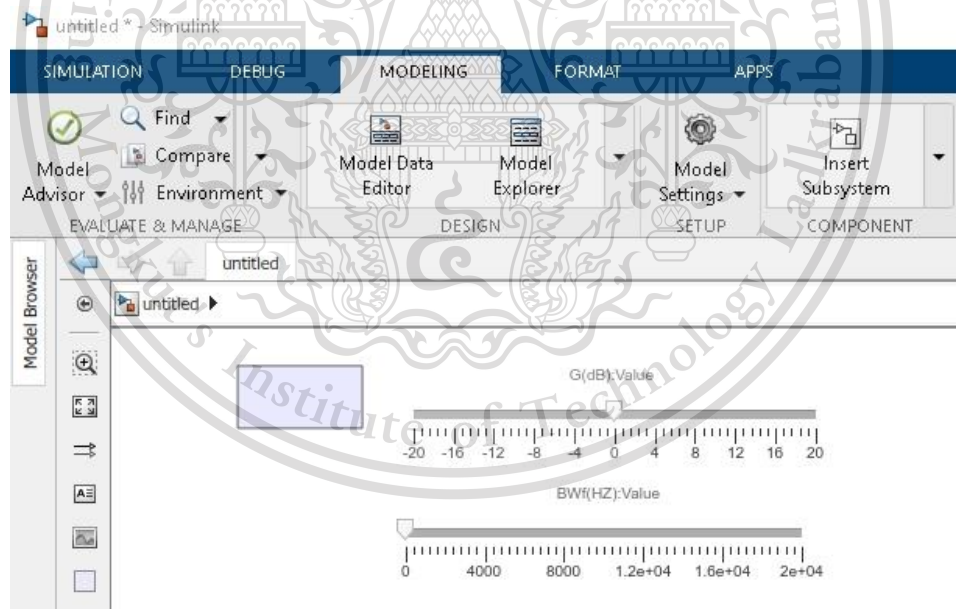
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.146 Slider ของ low boost cut

จากนั้นทำการจัดกลุ่ม โดยไปที่แถบเครื่องมือ Modeling แล้วไปที่ Insert subsystem แล้วเลือก area จากไดก่ล่อง area ออกมา ดังรูปที่ 5.147 แล้วทำการลากให้คลุมพื้นที่ในส่วนที่ต้องการ ดังรูปที่ 5.148 แล้วทำการตั้งชื่อ area

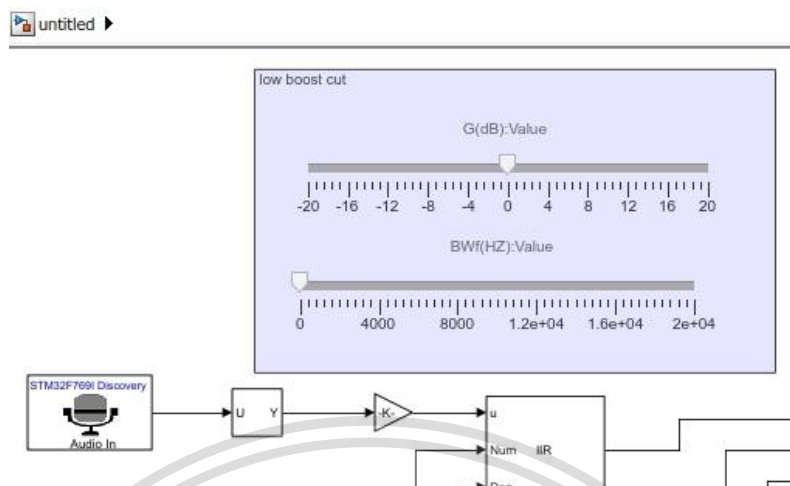


รูปที่ 5.147 area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

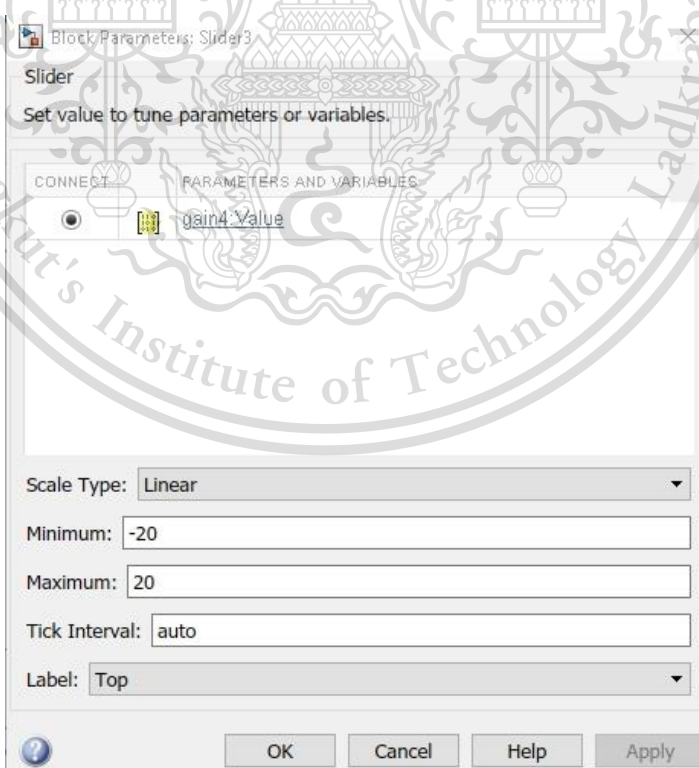
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.148 Group area ของ low boost cut

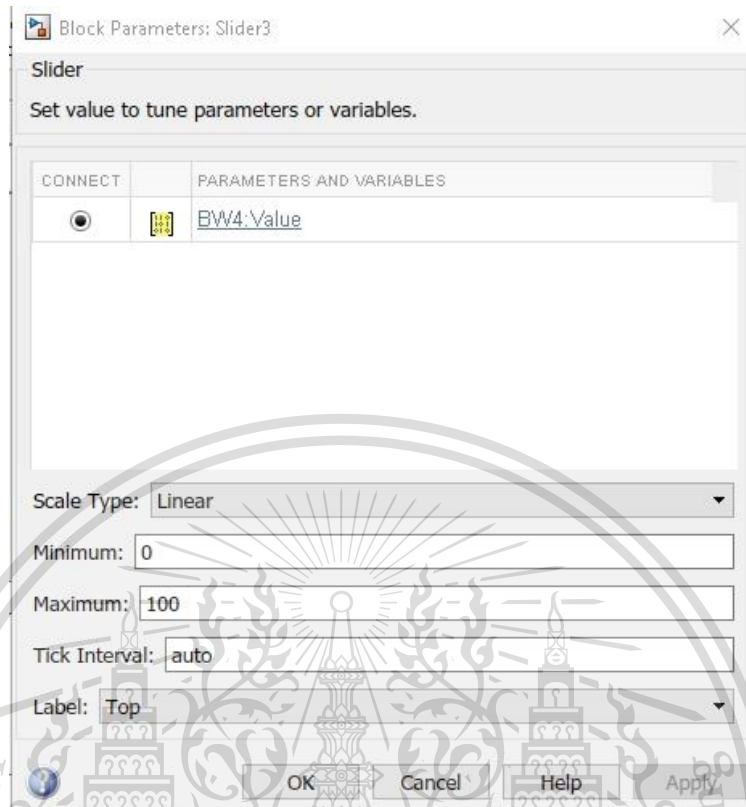
จากนั้นทำการใช้ Slider เพื่อเป็นตัว External mode ของ high boost cut ได้ด้วยการทำเช่นเดิมแต่เชื่อมต่อกับ gain4:Value และ BW4:Value ดังรูปที่ 5.149 และ 5.150 โดยที่จะกำหนดค่า min และ max ของ gain4:Value เป็น -20 และ 20 ตามลำดับ และกำหนดค่า min และ max ของ BW4:Value เป็น 0 และ 100 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.149 เชื่อมต่อ slider กับบล็อก gain4:Value  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

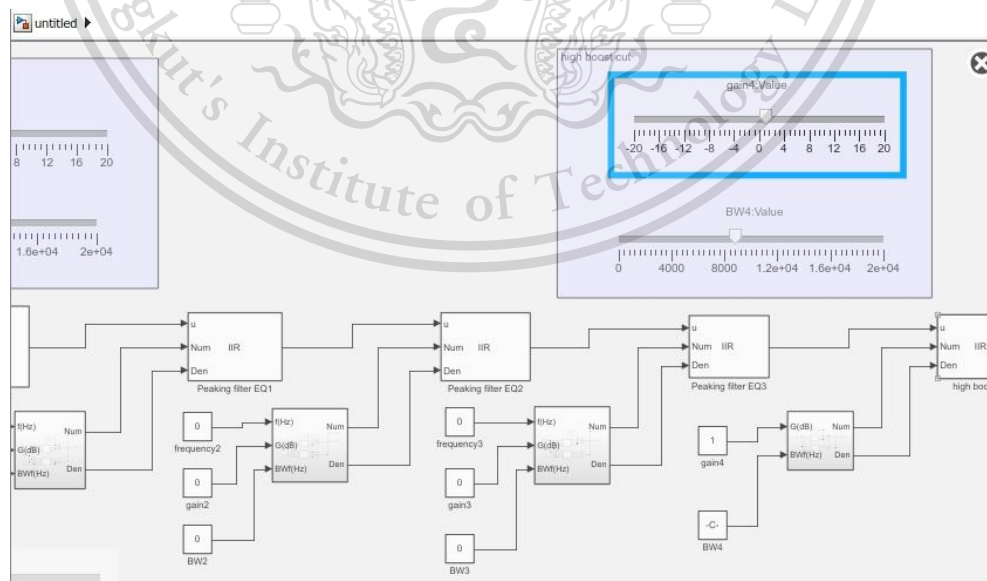
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.150 เชื่อมต่อ slider กับบล็อก BW4:Value

และทำการจัดกลุ่มของ high boost cut ดังรูปที่ 5.151



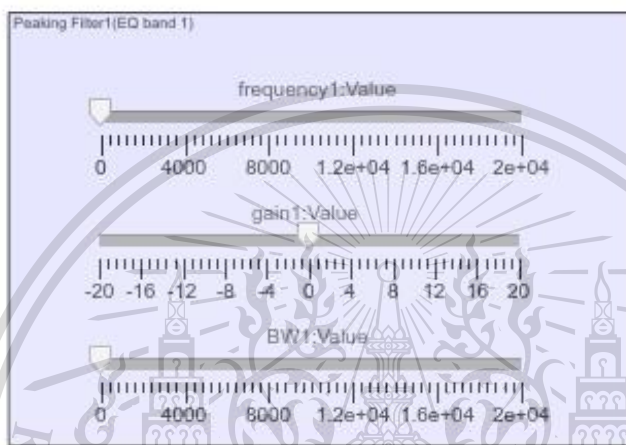
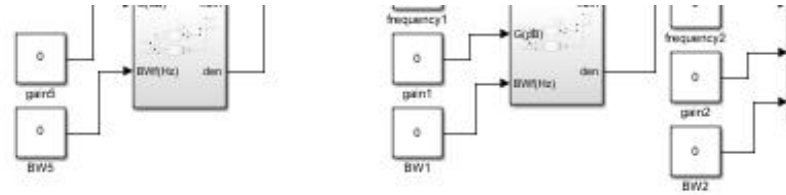
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.151 Group area ของ high boost cut

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

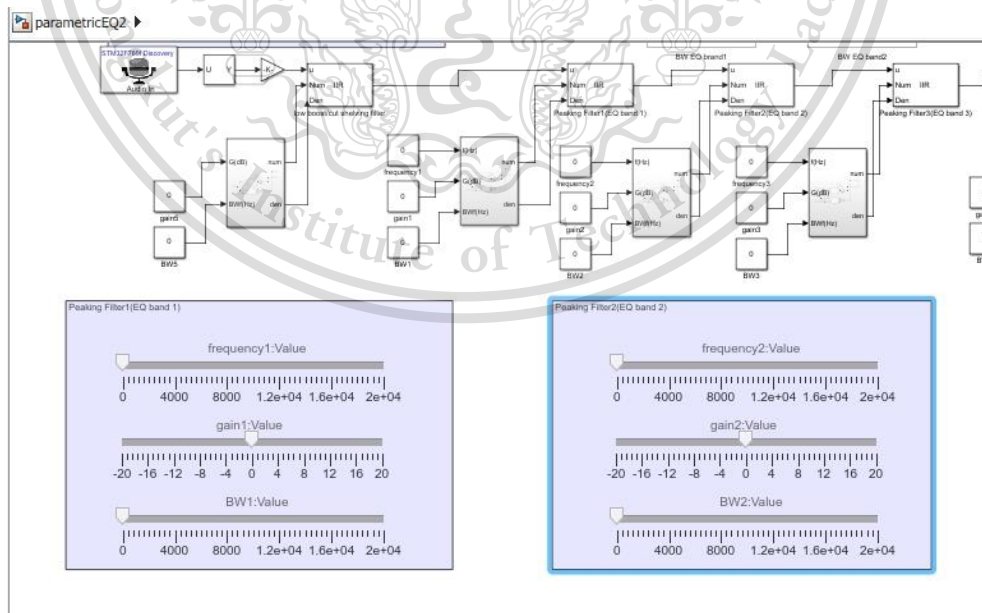
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้นทำการเชื่อมต่อ Slider กับ Peaking filter (EQ band) ทั้ง 3 แล้วทำการจัดกลุ่ม จะได้ดังรูปที่ 5.152, 5.153 และ 5.154



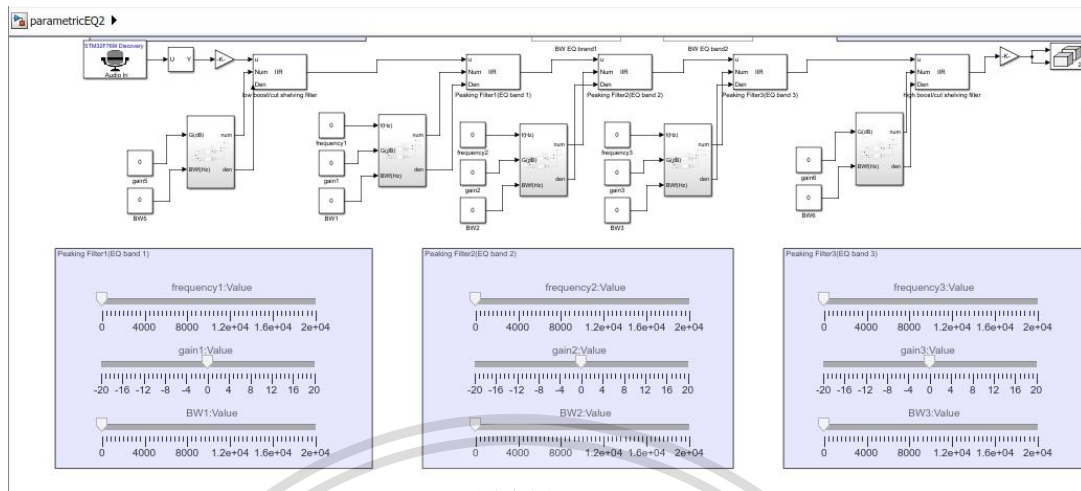
รูปที่ 5.152 Group area ของ Peaking filter (EQ band 1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 5.153 Group area ของ Peaking filter (EQ band 2) ใ้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

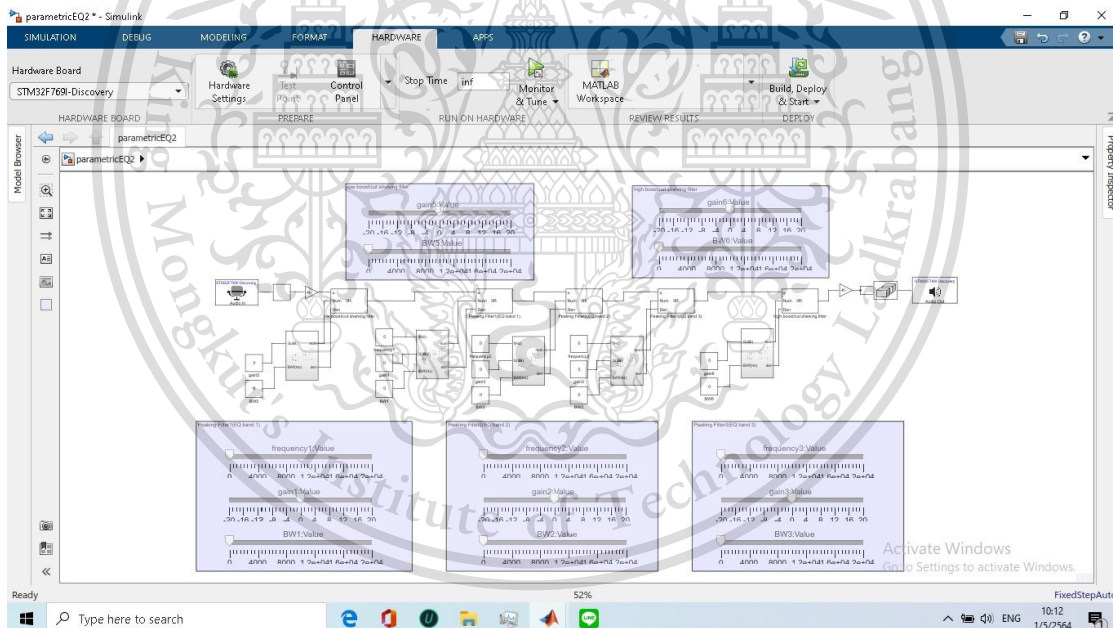
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.154 Group area ของ Peaking filter (EQ band 3)

เมื่อทำการจัดกลุ่มเสร็จจะได้วงจร Patametric Equalizer ดังรูปที่ 5.155



รูปที่ 5.155 วงจร Patametric Equalizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.5 ผลการทดสอบการสร้าง Parametric Equalizer

ทดลองวัดผลการสร้าง Real Time Parametric Equalizer ใน frequency domain โดยใช้ Dynamic Signal Analyzer วัด โดยปรับ gain, BW และ frequency เป็น 0 ทุกตัวจะได้ดังรูปที่ 5.156



รูปที่ 5.156 frequency response ของ Parametric EQ ที่ปรับ gain, BW และ frequency เป็น 0 ทุกตัว

เมื่อทำการปรับค่า gain, BW และ frequency ไปเรื่อยๆ จะเห็นว่ากราฟ frequency response ของ Parametric EQ จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ถ้าเราปรับให้ได้ค่าตามที่ออกแบบ จะทำให้ได้กราฟ frequency response ที่วัดแบบ Real time มีกราฟลักษณะเหมือนกันกราฟที่ทำการทดสอบใน Matlab ดังรูปที่ 5.157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.157 frequency response ของ Parametric EQ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม

- [1] stlfe. “Discovery kit with STM32F769NI MCU”  
[https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00276557-discovery-kit-with-stm32f769ni-mcu-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00276557-discovery-kit-with-stm32f769ni-mcu-stmicroelectronics.pdf)
- [2] C.H. Slump, C.G.M. van Asma, J.K.P. Barels “Design And Implementation Of A Audio Signal Processing Linear-Phase Equalizer In Digital.” University of Twente, 2017.\
- [3] R. A. Greiner, Michael Schoessow “*Design Aspects of Graphic Equalizers*” Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1983.
- [4] Joshua D. Reiss. “Ieee Transactions On Audio, Speech, And Language Processing” Design of Audio Parametric Equalizer Filters Directly in the Digital Domain, 2011.
- [5] D. S. Sidhu, J. S. Dhillon, Dalveer Kaur. “International Journal of Signal Processing Systems” Design of Higher Order Digital IIR Low Pass Filter Using Hybrid Differential Evolution, 2016.
- [6] Elena Punskeya. “Design of FIR Filters”  
<https://www-sigproc.eng.cam.ac.uk/~op205>
- [7] Sophocles J. Orfanidis “*Digital Parametric Equalizer Design With Prescribed Nyquist-Frequency Gain*” Department of Electrical & Computer Engineering, Rutgers University, 1983.
- [8] Martin Holters, Udo Zölzer. “Graphic Equalizer Design Using Higher-Order Recursive Filters” Department of Signal Processing and Communications, Helmut-Schmidt-University, 2006.
- [9] Balra J. Singh. “Higher Order Optimal Stable Digital IIR Filter Design Using Heuristic Optimization” Department of Electronics and Communication Engineering, Giani Zail Singh Punjab Technical University Campus, 2015.
- [10] James M. Montgomery. “Implementing a 10-Band Stereo Equalizer on the DSP56311 EVM Board” Freescale Semiconductor, Inc., 2005.
- [11] J. Le Bihan. “Impulse Response and Generating Functions of sinc FIR Filters” France, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

