



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรกรองความถี่อันดับสูงเพื่อใช้งานในระบบแพร่กระจายคลื่น  
โทรทัศน์แบบดิจิทัล  
High Order Filter Circuit in using Digital Video Broadcasting

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพล บุญจันทร์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง  
นายชูชาติ พุตระกุล  
นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรกรองความถี่อันดับสูงเพื่อใช้งานในระบบแพร่กระจายคลื่น  
โทรทัศน์แบบดิจิทัล

High Order Filter Circuit in using Digital Video Broadcasting



ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพล บุญจันทร์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง  
นายชูชาติ พุตระภูด  
นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิ์ชัย

RCH

๙๘๕๒๖

๒๕๕๕

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **143558**  
วันเดือนปี **17 ส.ค. 2559**

b. 12๗๙๓๒๙๒  
i. ....

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) วงจรกรองความถี่อันดับสูงเพื่อใช้งานในระบบแพร่กระจายคลื่นโทรทัศน์แบบดิจิทัล แหล่งเงินทุน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 72,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

- 1. ผศ.สุรพล บุญจันทร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
- 2. ผศ. ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
- 3. นายชูชาติ พุดระกุล สำนักงานคณบดี (งานเทคโนโลยีสารสนเทศ) คณะวิศวกรรมศาสตร์
- 4. นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิ์ชัย สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการสื่อสารระบบโทรทัศน์ดิจิทัล (Digital Video Broadcasting - Terrestrial: DVB-T) ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายประเทศทั่วโลก นอกจากนี้วงจรกรองความถี่แถบผ่านก็มีบทบาทสำคัญต่อระบบการสื่อสารไร้สายด้วยเช่นกัน โดยที่สัญญาณที่ส่งออกไปและสัญญาณที่ได้รับต้องมีการกรองความถี่ในช่วงความถี่แบนด์วิดท์ตามที่เราต้องการ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบและทำการสร้างวงจรกรองความถี่แถบผ่านแบบ Chebyshev Order 5 บนย่าน UHF ช่วงความถี่ 470 - 478 MHz แบนด์วิดท์เท่ากับ 8 MHz สำหรับระบบ DVB-T ซึ่งในขั้นตอนแรกของการออกแบบวงจร เราจะทำการประมาณค่านวมและประมาณค่าโดยใช้องค์ประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ หลังจากนั้นเมื่อออกแบบวงจรเสร็จจะทำการจำลองผลบนพื้นฐานโครงสร้าง lumped-element โดยโปรแกรม Microwave Office และทำการสร้างจริง ในส่วนขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวัดและทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการสร้างและการจำลอง และทำการปรับแต่งจนกระทั่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี

คำสำคัญ : ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T วงจรกรองความถี่แถบผ่าน lumped-element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: High Order Filter Circuit in using Digital Video Broadcasting.....  
 Researcher Surapol Boonjun, Pisit Boonsrimuang, Chouchart Poutrakul and.....  
 Narongsak Manositthichai.....  
 Faculty: .....Engineering..... Department .....Telecommunication Engineering.....

## ABSTRACT

Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T) communication technology is being adopted by many countries all over the world. Furthermore, Band Pass Filter (BPF) plays a significant role in wireless communication systems. Transmitted and received signals have to be filtered at a certain center frequency with a specific bandwidth. In this research, is the study of the design and the fabrication of 5<sup>th</sup> Order Chebyshev Band Pass Filter in UHF frequency range (470-478 MHz), bandwidth 8 MHz for the DVB-T system. In designing of Band Pass Filter, the first step is to carry out an approximated calculation based on using of concentrated components like inductors and capacitors. After getting the specifications required, we realized the filter structure based on lumped-element topology by using Microwave Office program. Experimental verification gives comparison, how close the theoretical results and measurements look like.

Keyword : Digital Video Broadcasting – Terrestrial, Band Pass Filter, lumped-element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และความอนุเคราะห์ของบุคคลหลาย ท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ท่านอธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนการดำเนินการวิจัยและอำนวยความสะดวกทุกประการ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการอำนวยความสะดวก อีกทั้งยังให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย

ขอขอบคุณ คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ เจ้าของเอกสาร บทความ ตำรา หนังสือทุกท่านที่คณะผู้วิจัยใช้ในการสืบค้นข้อมูลที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่าน

ผศ.สุรพล บุญจันทร์  
 ผศ. ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง  
 นายชูชาติ พุทธระกุล  
 นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review).....	5
บทที่ 3 การแพร่ภาพโทรทัศน์พื้นฐาน (Television Broadcasting).....	7
3.1 ประเภทของการแพร่ภาพโทรทัศน์ [1].....	7
3.1.1 โทรทัศน์แอนะล็อก (Analog Television).....	7
3.1.2 โทรทัศน์ดิจิทัล (Digital Television).....	7
3.1.3 ประวัติความเป็นมาของโทรทัศน์.....	7
3.2 หลักการแพร่ภาพเบื้องต้น.....	8
3.2.1 การสแกนภาพ.....	9
3.2.2 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์แอนะล็อก.....	9
3.2.3 ระบบการส่งสัญญาณของโทรทัศน์ดิจิทัล.....	10
3.2.4 การส่งสัญญาณโทรทัศน์.....	10
3.2.5 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ในประเทศไทย.....	10
3.3 โทรทัศน์ระบบดิจิทัล [9].....	11
3.3.1 กลไกการทำงานของโทรทัศน์ระบบดิจิทัล.....	11
3.3.2 การพัฒนาโทรทัศน์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Television).....	12
3.3.3 การส่งโทรทัศน์ในระบบดิจิทัล (Digital).....	12
3.4 DVB-T.....	12
3.4.1 DVB (Digital Video Broadcasting).....	13
3.4.2 ATSC (Advanced TV System Committee) หรือ 8VSB (Vestigial Sideband).....	13
3.4.3 ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting).....	13
3.4.4 DMB (Digital Media Broadcasting).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ทฤษฎีและการออกแบบวงจรกรองความถี่.....	14
4.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน.....	14
4.1.1 ตัวต้านทาน (Resistor) [14].....	14
4.1.2 ชนิดของตัวต้านทาน.....	15
4.1.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor) [16].....	19
4.1.4 ชนิดของตัวเก็บประจุ.....	20
4.1.5 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) [17].....	24
4.1.6 ไดโอด.....	27
4.1.7 ไดโอดออดมคติ.....	27
4.1.8 แบบจำลองไดโอดในทางปฏิบัติ.....	28
4.1.9 รูปร่างของไดโอด.....	29
4.1.10 ทรานซิสเตอร์ (Transistor) [18].....	29
4.1.11 ชนิดของทรานซิสเตอร์.....	30
4.1.12 รูปร่างและลักษณะของทรานซิสเตอร์.....	30
4.2 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit) [19].....	32
4.2.1 ประเภทของวงจรกรองความถี่.....	32
4.2.1.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF).....	32
4.2.1.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter: HPF).....	35
4.2.1.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF).....	36
4.2.1.4 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter: BRF).....	37
4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่สำหรับระบบ DVB.....	38
4.3.1 การออกแบบวงจรกรองย่านความถี่ผ่านช่วง 470-478 MHz.....	39
4.3.2 ผลการทดลองของวงจรกรองย่านความถี่ผ่านช่วง 470-478 MHz.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก.....	45
ผลการทดลองการตอบสนองความถี่ของ BPF (470-478 MHz).....	46
ภาคผนวก ข ตารางความถี่ ที่วีรวม.....	50
ภาคผนวก ค คู่มือการใช้งานโปรแกรม Microwave Office.....	53
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ย่นความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศไทย.....	11
4.1 สัญลักษณ์ของตัวต้านทาน [15].....	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างวงจร Band Pass Filter Order 5 สำหรับระบบ DVB-T.....	5
2.2 รูปแบบผลตอบสนองความถี่และเฟสของวงจร Band Pass Filter.....	7
3.1 งานหมุนนิพโกว์ (Nipkow).....	8
3.2 พื้นฐานการส่งและรับสัญญาณ.....	8
3.3 หลักการแสกนภาพ.....	9
3.4 การส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลของภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วโลก.....	15
4.1 สัญลักษณ์ของตัวต้านทาน [15].....	16
4.2 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม.....	16
4.3 ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ.....	17
4.4 ตัวต้านทานแบบไวร์วาร์ด.....	18
4.5 ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา.....	18
4.6 รูปร่างและสัญลักษณ์ของตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มบาง.....	18
4.7 ลักษณะรูปร่างของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้.....	19
4.8 ลักษณะรูปร่างของตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้.....	20
4.9 รูปร่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ.....	21
4.10 แสดงการเกิดความจุจากการบ่อนแรงเคลื่อนไฟฟ้า.....	21
4.11 ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่.....	22
4.12 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์.....	22
4.13 ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์.....	23
4.14 ตัวเก็บประจุชนิดโปลิเอสเตอร์.....	23
4.15 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก.....	24
4.16 ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์.....	25
4.17 ตัวเก็บประจุชนิดฟีดทอร์.....	27
4.18 ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรไพลีน.....	28
4.19 ตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า.....	29
4.20 ตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า.....	30
4.21 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้.....	31
4.22 ตัวเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆ.....	29
4.23 หลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ.....	30
4.24 แสดงการเหนี่ยวนำจากขดลวดชุดที่ 1 ไปยังขดลวดชุดที่ 2.....	31
4.25 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ.....	29
4.26 โครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของไดโอด.....	30
4.27 (ก) วงจรไดโอดแบบไบอัสตรงและ (ข) แบบไบอัสกลับ.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.28 (ก) การสวิตช์ปิดวงจรแทนไดโอด และ (ข) การใช้สวิตช์เปิดวงจรแทนไดโอด สำหรับภาพที่ 4.27	30
4.29 คุณสมบัติ V-I ของไดโอดอุดมคติ	30
4.30 คุณสมบัติของไดโอดในทางปฏิบัติอย่างง่าย	30
4.31 คุณสมบัติ V-I ของแบบจำลองอย่างง่ายของซิลิกอนไดโอด	30
4.32 รูปร่างของไดโอดชนิดต่าง ๆ	30
4.33 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP	30
4.34 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN	30
4.35 ลักษณะของทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N3906 และ 2N3904	30
4.36 ลักษณะของทรานซิสเตอร์ตัวถัง TO18 เบอร์ BC107	30
4.37 ลักษณะตัวถังและตำแหน่งขาของทรานซิสเตอร์แบบต่าง ๆ	30
4.38 วงจร LPF อันดับ 1	30
4.39 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร LPF อันดับ 1	30
4.40 วงจร LPF อันดับ 2 [7]	30
4.41 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร LPF อันดับ 2	30
4.43 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร HPF อันดับ 1	30
4.44 ตัวอย่างวงจร BPF	30
4.45 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร BPF	30
4.46 จรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงและการตอบสนองความถี่	30
4.47 ตัวอย่างวงจรสมมูลของ Band Pass filter	30
4.48 การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่าน แบบ Chebyshev Order 5	30
4.49 การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านโดยโปรแกรม Microwave office	30
4.50 ผลการจำลองผลตอบสนองความถี่ผ่านของ แบบ Chebyshev Order 5	30
4.51 วงจรกรองความถี่ผ่าน แบบ Chebyshev Order 5 ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์	30
4.52 ค่า Return Loss ของวงจรกรองความถี่ผ่านที่ได้จากการวัด	30
4.53 ค่า Magnitude ของวงจรกรองความถี่ผ่านที่ได้จากการวัด	30
4.54 ค่า Phase ของวงจรกรองความถี่ผ่านที่ได้จากการวัด	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

เนื่องจากปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์แบบดิจิทัลกำลังได้รับความนิยม และมีการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก ในส่วนของระบบเครื่องส่งสำหรับการส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลนั้น มีหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปยังภาครับโดยทำให้สัญญาณที่รับได้มีความแรงมากที่สุดหรือรับสัญญาณได้ดีและ ส่วนประกอบหนึ่งที่มีสำคัญของระบบโทรทัศน์ดิจิทัลก็คือ วงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่ (Filter) คือ วงจรที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณให้ความถี่เฉพาะที่ต้องการให้ผ่านออกมาได้เท่านั้น ส่วนความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการผ่านจะถูกลดทอน (Attenuate) จนหมดไป วงจรกรองความถี่ที่ใช้งานกันมีอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบที่เป็นวงจรพาสซีฟ (Passive) และแบบแอคทีฟ (Active) วงจรในแบบที่เป็นพาสซีฟนั้น จะใช้เพียงอุปกรณ์ประเภทความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น แต่ในวงจรประเภทแอคทีฟจะรวมถึงทรานซิสเตอร์และออปแอมป์ด้วย

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter) อันดับสูง (Order 5) ในย่านความถี่สูง (UHF) สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ภาคพื้นดิน (DVB-T) บนย่านความถี่ 470-860 MHz โดยทำการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่านแบบ Chebyshev บนพื้นฐานโครงสร้าง lumped-element ระหว่างช่วงความถี่ 470-478 MHz มีแบนด์วิดท์ เท่ากับ 8 MHz ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของกระทรวงคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ได้นำมาตรฐาน ETSI EN 300 744 [1] ของประเทศในแถบยุโรปมาใช้ งาน เนื่องจากเป็นระบบส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลที่ทำงานบนช่วงความถี่ UHF คณะผู้วิจัยจึงได้ ออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ที่ Order 5 เนื่องจากเมื่อปรับ Order ที่สูงมากกว่านี้ ถึงแม้ว่าสัญญาณ จะมีการแกว่งน้อยก็ตาม แต่จะมีผลทำให้เกิดการการลดทอนเพิ่มขึ้นด้วย และได้นำวิธี Chebyshev มาใช้ ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ดังกล่าว เนื่องจากวิธีนี้เราสามารถทำการปรับค่าการแกว่งของ แอมพลิจูดหรือ Ripple ได้ด้วย

### 1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อถ่ายทอดความรู้ที่ได้ทำการวิจัยนำสู่สังคมไทย
- 2) เพื่อให้รู้จักการพัฒนาอุปกรณ์เอาไว้ใช้งานเองได้
- 3) เพื่อศึกษาหลักการออกแบบและการสร้างวงจรกรองความถี่อันดับสูงสำหรับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T
- 4) เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรกรองความถี่อันดับสูง (Band Pass Filter)
- 5) เพื่อสร้างวงจรกรองความถี่แถบผ่านสำหรับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) วิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่าน Order 5 สำหรับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T
- 2) สร้างวงจรกรองความถี่แถบผ่านแบบ Chebyshev Order 5 ที่มีค่า Ripple เท่ากับ 0.1 dB สำหรับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T
- 3) ออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่านในย่านความถี่ UHF ช่วงความถี่ 470-478 MHz และแบนด์วิดท์เท่ากับ 8 MHz สำหรับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T

## 1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) เตรียมการวิจัยโดยทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานของวงจรกรองความถี่
- 2) ศึกษาทฤษฎีวงจรกรองความถี่อันดับสูงสำหรับระบบ DVB-T
- 3) ออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน
- 4) จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรกรองความถี่
- 5) ดำเนินการสร้าง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด
- 6) ทดสอบ ประมวลผล และแก้ไข
- 7) สรุปผลโครงการวิจัยและข้อเสนอแนะ พร้อมกับจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1) เตรียมการวิจัยโดยทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานของวงจรกรองความถี่												
2. ศึกษาทฤษฎีวงจรกรองความถี่อันดับสูงสำหรับระบบ DVB-T												
3. ออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน												
4. จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรกรองความถี่												
5. ดำเนินการสร้าง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด												
6. ทดสอบ ประมวลผล และแก้ไข												
7. สรุปผลโครงการวิจัยและข้อเสนอแนะ พร้อมกับจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) นำความรู้จากการวิจัยเผยแพร่สู่ประชาชนทั่วไปหรือบุคคลที่สนใจ
- 2) นำชิ้นงานจากการวิจัยเป็นตัวอย่างการศึกษาและทดลองสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
- 3) ใช้เพื่อการเรียนการสอนสำหรับวิชา Telecommunications Engineering Laboratory
- 4) สร้างวงจรกรองความถี่แถบผ่านสำหรับนำไปใช้งานในระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T
- 5) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบและหลักการทำงานของวงจรกรองความถี่อันดับสูงที่ทำงานบนย่านความถี่สูง
- 6) สามารถนำวงจรกรองความถี่ที่ได้สร้างขึ้นไปวิจัยและพัฒนาต่อยอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในระบบสื่อสารไร้สายวงจรกรองความถี่นั้นจะมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งวงจรดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่กรองความถี่ที่ไม่ต้องการออกให้คงเหลือเพียงแต่ความถี่ที่ต้องการ ที่จะทำการส่งออกอากาศเพื่อไม่ให้ความถี่อื่น ๆ เข้ามารบกวนสัญญาณ นั้นหมายความว่า การตรวจจับสัญญาณในภาครับจะกระทำได้ง่ายขึ้นเช่นกัน อีกทั้งยังสามารถลดการรบกวนของช่องความถี่ข้างเคียงได้อีกด้วย โดยปกติแล้ววงจรกรองความถี่นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกัน นั่นก็คือวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog Filter) และวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital Filter) โดยรูปแบบพื้นฐานของวงจรกรองความถี่มีอยู่ด้วยกัน 4 แบบคือ

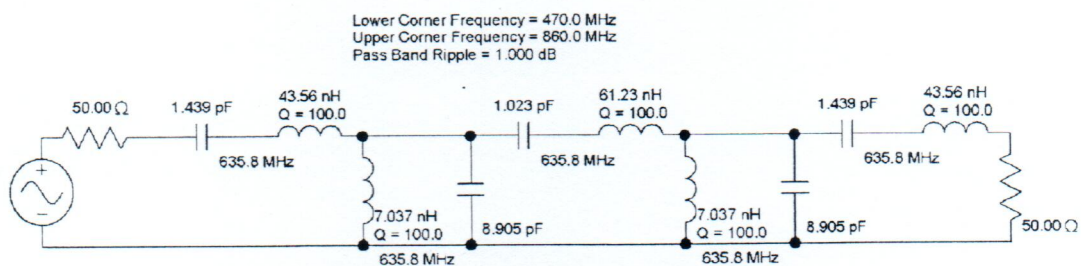
- 1) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่สูงออกไป
- 2) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter: HPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำออกไป
- 3) วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter: BPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงความถี่บางช่วงผ่านไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าออกไป
- 4) วงจรกำจัดแถบความถี่ (Band Reject Filter: BRF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าผ่านออกไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณในช่วงแถบความถี่ที่กำหนดไว้

การสร้างวงจรกรองความถี่สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งจะแบ่งตามชนิดของวงจรกรองความถี่ตามอุปกรณ์ที่สร้างได้ เป็น 2 ชนิดคือ

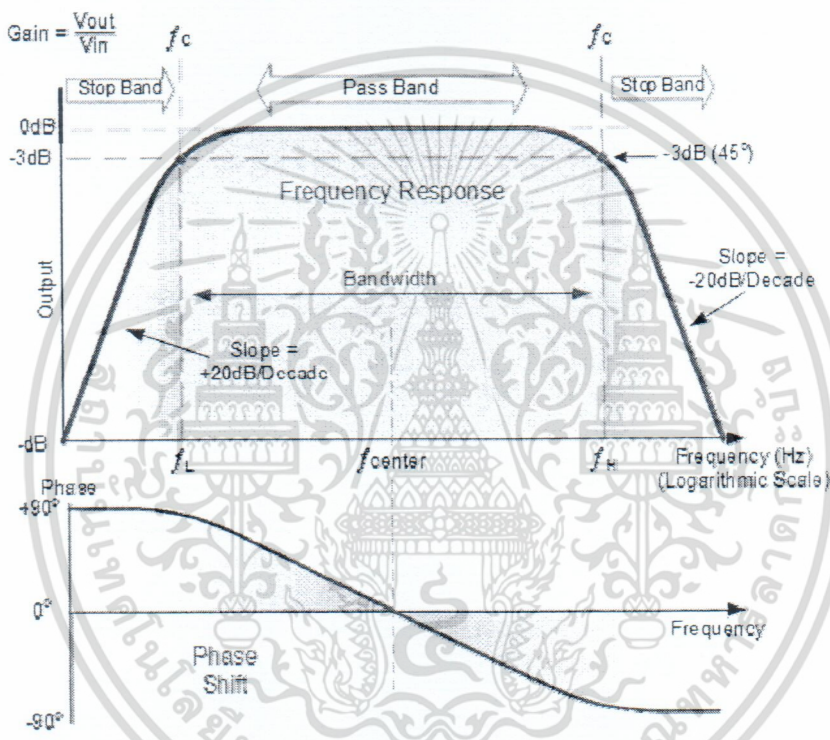
- วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์ 3 ตัว คือ ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) เนื่องจาก impedance ของ C และ L จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ โดยการนำไปต่อในวงจรตามตำแหน่งที่เหมาะสม (อนุกรม/ขนาน)
- วงจรกรองแอคทีฟ (Active Filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ หรือไอซีวงจรรวมต่าง ๆ โดยนำมาต่อร่วมกับตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุ ข้อดีของวงจรแบบนี้ก็คือสามารถขยายสัญญาณได้ด้วย และยังสามารถทำงานในระบบแอนะล็อกหรือดิจิทัลได้ด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวงจรกรองความถี่แถบผ่าน หรือ Band Pass Filter ซึ่งในการออกแบบวงจรมันจะศึกษาการออกแบบวงจรให้สามารถกรองความถี่ให้มีประสิทธิภาพมาก จึงจำเป็นต้องใช้วงจรกรองความถี่อันดับสูง และอีกทั้งในการออกแบบให้สามารถใช้งานได้กับระบบส่งสัญญาณภาพและเสียงในระบบดิจิทัลนั้นจะต้องกำหนดให้ค่าแบนด์วิดท์มากกว่า 7 MHz และสามารถทนต่อกำลังส่งสัญญาณที่มีค่าสูง ๆ ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำไปใช้กับระบบแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-T โดยทำการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่านซึ่งเป็นส่วนที่อยู่หลังจากผ่านวงจรขยายกำลังสัญญาณ นอกจากนั้นยังสามารถใช้งานในย่านความถี่สูงได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างวงจร Band Pass Filter Order 5 สำหรับระบบ DVB-T



ภาพที่ 2.2 รูปแบบผลตอบสนองความถี่และเฟสของวงจร Band Pass Filter

## 2.2 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

เนื่องจากทางคณะผู้วิจัยได้ผลิตอุปกรณ์วงจรกรองความถี่ที่ใช้ในเครื่องส่งวิทยุชุมชนขึ้นเพื่อออกจำหน่าย ซึ่งอุปกรณ์ที่ทางคณะผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นนั้นเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำที่ทำงานอยู่ในย่านความถี่วิทยุ VHF ซึ่งสามารถที่จะกรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพลดการรบกวนช่องสัญญาณข้างเคียงได้ ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลพบว่า การส่งสัญญาณวิทยุกรองความถี่สำเร็จรูปจากต่างประเทศนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นคณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญตรงที่ว่า ควรจะวิจัยออกแบบวงจรกรองความถี่ให้สามารถใช้ในระบบส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบดิจิทัลได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดและสามารถยังเป็นเครื่องต้นแบบได้อีกด้วย โดยงานวิจัย [1]-[3] ได้มีการออกแบบวงจรกรองความถี่เพื่อใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารระบบแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล และยังมีงานวิจัยอื่น ๆ อีกมากมายที่ให้ความสนใจในเรื่องนี้ ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่สำหรับระบบ DVB-T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. L. Angrisani and M. Vadursi, "On the optimal sampling of bandpass measurement signals through data acquisition systems," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 1-9, Apr. 2008.
2. R. Vaughan, N. Scott, and D. White, "The theory of bandpass sampling," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 39, no. 9, pp. 1973-1984, Sep. 1991.
3. L. Angrisani and M. Vadursi, "On the optimal sampling of bandpass measurement signals through data acquisition systems," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 1-9, Apr. 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การแพร่ภาพโทรทัศน์พื้นฐาน (Television Broadcasting)

#### 3.1 ประเภทของการแพร่ภาพโทรทัศน์ [1]

ประเภทของการแพร่ภาพโทรทัศน์แบ่งตามลักษณะการทำงานได้เป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่

##### 3.1.1 โทรทัศน์แอนะล็อก (Analog Television)

โทรทัศน์แอนะล็อกเป็นโทรทัศน์ที่มีระบบการส่งสัญญาณภาพและเสียงในรูปสัญญาณแอนะล็อกแบบเอเอ็ม (A.M.) และเอฟเอ็ม (F.M.) โดยส่งเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โทรทัศน์ชนิดนี้มีการใช้งานทั่วไปอยู่ในระบบ เช่น โทรทัศน์ระบบเอ็นทีเอสซี (NTSC) พัล (PAL) และซีแคม (SECAM)

##### 3.1.2 โทรทัศน์ดิจิทัล (Digital Television)

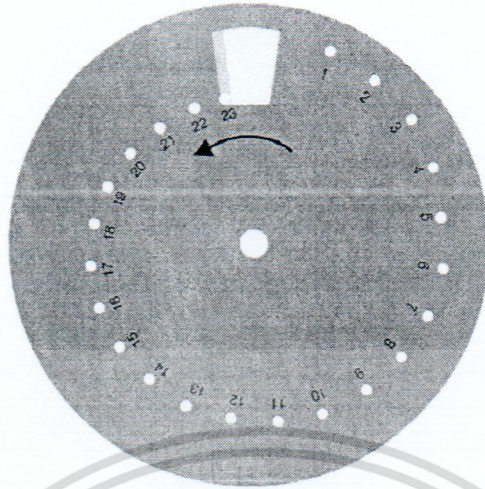
โทรทัศน์ดิจิทัลเป็นโทรทัศน์อีกรูปแบบมาตรฐานที่พัฒนามาจากโทรทัศน์แบบแอนะล็อก มีระบบการส่งสัญญาณภาพและเสียงแบบดิจิทัลคือส่งข้อมูลเป็นบิต การส่งข้อมูลแบบนี้สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าแบบแอนะล็อกในหนึ่งช่องสัญญาณ จึงเรียกได้อีกอย่างว่ามัลติแคสติง (Multicasting) การส่งสัญญาณเป็นแบบดิจิทัลจึงทำให้ได้คุณภาพของภาพและเสียงดีกว่าเช่น โทรทัศน์ระบบความคมชัดสูง (HDTV) [2]

##### 3.1.3 ประวัติความเป็นมาของโทรทัศน์

จากบันทึกใน Television Technology Demystified [3] ได้ระบุว่า การเริ่มต้นของโทรทัศน์เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2416 จากการที่ลีโอนาร์เมย์ (Leonard May) พนักงานโทรเลขชาวไอริชได้ค้นพบสารเซลเลนียมที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดความคิดในการเปลี่ยนสัญญาณภาพให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ต่อมาในปี พ.ศ.2427 พอล นิพโค (Paul Nipkow) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้คิดค้นหลักการสแกนภาพที่ใช้ระบบจานหมุนแบบกลไกเป็นครั้งแรก ต่อมาในปี พ.ศ.2454 แคมเบลล์ สวินตัน (Campbell Swinton) ได้นำหลอดรังสีแคโทดมาใช้ในการรับส่งภาพของการสแกนภาพแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้กลายเป็นแนวความคิดให้ วลาดิเมอร์ ซวอร์คิน (Vladimir Zworykin) ประดิษฐ์หลอดส่งภาพหรือไอคอนอสโคป (iconoscope) ซึ่งทำหน้าที่เก็บรูปและสแกนรูปไว้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหลายๆเส้น ในปี พ.ศ. 2466 และในปี พ.ศ. 2467 วลาดิเมอร์ ซวอร์คิน ได้ประดิษฐ์หลอดรับภาพ (Kinescope) ซึ่งทำหน้าที่นำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก Iconoscope มายิงบนจอเรืองแสงที่มีตำแหน่งสอดคล้องกัน [4] และในปี พ.ศ.2468 ได้มีนักวิทยาศาสตร์สองคนคือจอห์น โลจี แบร์ด (John Logie Baird) ชาวอังกฤษและชาร์ลส์ ฟราน เจนคินส์ (Charles Francis Jenkins) ชาวอเมริกันได้ทำการทดลองส่งภาพเงาโดยไม่ใช้สายซึ่งเป็นการทดลองออกอากาศครั้งแรกโดยใช้งานหมุนของปอด นิพโคว์ (Paul Nipkow) ต่อมาได้มีการพัฒนานำเอาระบบสีมาใช้ร่วมกับจานหมุนของปอด นิพโคว์ โดยในปี พ.ศ. 2471 จอห์น โลจี แบร์ด (John Logie Baird) ได้นำแผ่นกรองสีมาแยกสัญญาณสีได้สำเร็จโดยใช้งานหมุนแยกสีในการแยกสัญญาณออกเป็นสีพื้นฐานสามสีคือ แดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นต้น แบบหลักการและเทคนิคพื้นฐานต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับการแปลงภาพไปมากับสัญญาณภาพที่ได้โดยได้นำไปสร้างเป็นระบบโทรทัศน์ต่อมา [3]

อนึ่งการแพร่ภาพโทรทัศน์ขาว-ดำ เป็นครั้งแรกของโลกได้เกิดขึ้นที่ประเทศอังกฤษในปี พ.ศ.2479 และการแพร่ภาพโทรทัศน์สีเป็นครั้งแรกของโลกได้เกิดขึ้นที่ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ.2497 [3]

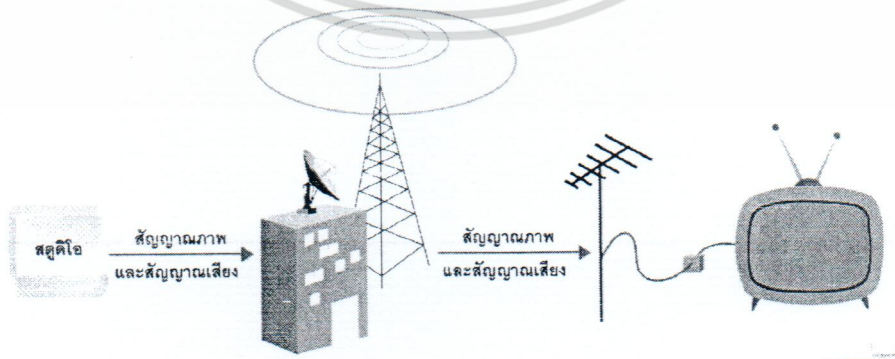
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 จานหมุนนิพโกว์ (Nipkow)

### 3.2 หลักการแพร่ภาพเบื้องต้น

หลักในการแพร่ภาพเบื้องต้นคือการส่งสัญญาณภาพในรูปแบบสัญญาณ A.M. และส่งสัญญาณเสียงในรูปแบบสัญญาณ F.M. โดยที่เครื่องส่งจะทำการเปลี่ยนภาพที่อยู่ในรูปพลังงานแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า (สัญญาณภาพ) แล้วทำการขยายให้มีกำลังมากขึ้น จากนั้นจึงนำไปผสมสัญญาณกับสัญญาณวิทยุและสัญญาณซิงโครไนซ์ที่จะช่วยทำให้สัญญาณดังกล่าวสอดคล้องหรือร่วมจังหวะกันได้แล้วแพร่กระจายออกสู่อากาศ ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนที่เครื่องรับจะทำการแยกสัญญาณภาพที่ผสมมา กับสัญญาณวิทยุกับสัญญาณซิงโครไนซ์ให้กลายเป็นภาพปรากฏที่หน้าจอเครื่องรับโทรทัศน์ ดังภาพที่ 3.2 โดยการที่เครื่องรับ และเครื่องส่งจะทำงานตรงจังหวะกันได้ นั้น เกิดจากสัญญาณซิงโครไนซ์ ที่ได้ทำการผสมสัญญาณเข้ากับสัญญาณภาพ และสัญญาณวิทยุก่อนส่ง เพราะสัญญาณซิงโครไนซ์เป็นสัญญาณที่ทำให้การสแกนเป็นไปอย่างถูกต้องทั้งในแนวตั้งและแนวนอน [5]

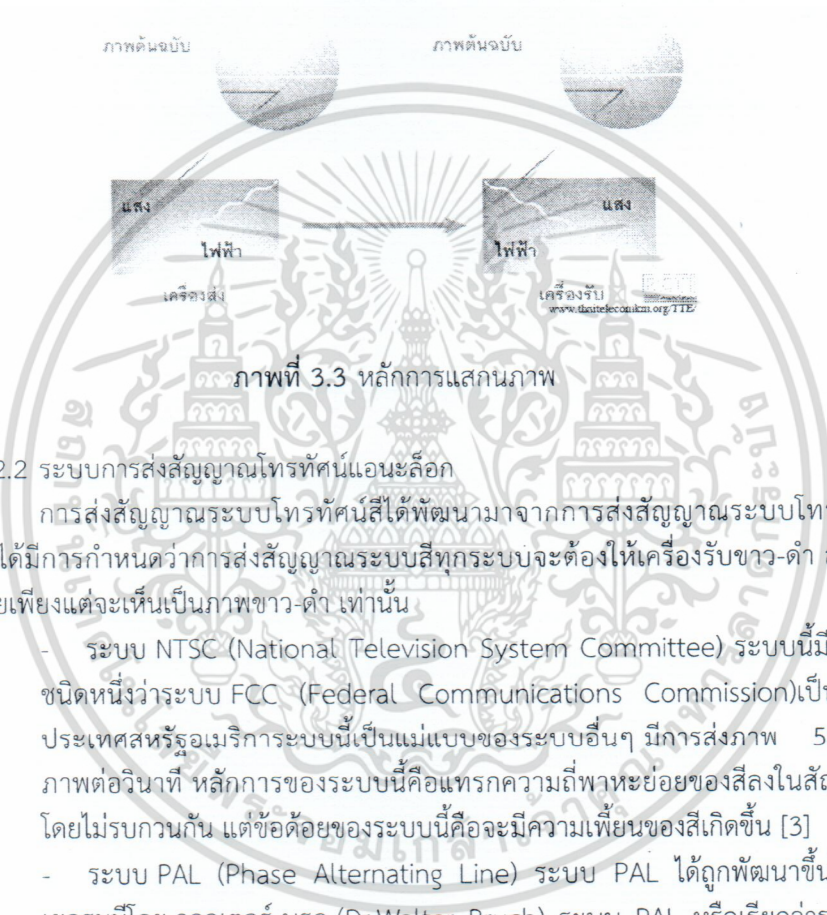


ภาพที่ 3.2 พื้นฐานการส่งและรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การแสดกนภาพ

ภาพโทรทัศน์ที่บันทึกไว้หรือแสดงออกทางหน้าจอจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆ เรียกว่า จุดภาพหรือพิกเซล ซึ่งพิกเซลเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนจากข้อมูลแสง (ความสว่างของภาพ) ให้เป็นค่าทางไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณภาพ และแทนสีแดง สีเขียว สีน้ำเงินในภาพโดยการใช้ลำแสงสแกนตามแนวนอนที่ละเส้น จากด้านซ้ายไปด้านขวา และจากด้านบนลงด้านล่าง สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะส่งไปแสดงผลที่เครื่องรับที่ละเส้นแบบเส้นต่อเส้น ซึ่งเครื่องรับจะใช้สัญญาณภาพเป็นสัญญาณควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อเขียนภาพที่หน้าจอเครื่องรับโทรทัศน์ตามภาพที่ส่งมาตั้งการทำงานเบื้องต้นของภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 หลักการแสดกนภาพ

### 3.2.2 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์แอนะล็อก

การส่งสัญญาณระบบโทรทัศน์สีได้พัฒนาจากการส่งสัญญาณระบบโทรทัศน์แบบขาว-ดำ โดยที่ได้มีการกำหนดว่าการส่งสัญญาณระบบสีทุกระบบจะต้องให้เครื่องรับขาว-ดำ สามารถรับสัญญาณได้ด้วยเพียงแต่จะเห็นเป็นภาพขาว-ดำ เท่านั้น

- ระบบ NTSC (National Television System Committee) ระบบนี้มีชื่อเรียกอีกชนิดหนึ่งว่าระบบ FCC (Federal Communications Commission) เป็นระบบของประเทศสหรัฐอเมริกา ระบบนี้เป็นแม่แบบของระบบอื่นๆ มีการส่งภาพ 525 เส้น 30 ภาพต่อวินาที หลักการของระบบนี้คือแทรกความถี่พาหะย่อยของสีลงในสัญญาณภาพ โดยไม่รบกวนกัน แต่ข้อด้อยของระบบนี้คือจะมีความเพี้ยนของสีเกิดขึ้น [3]
- ระบบ PAL (Phase Alternating Line) ระบบ PAL ได้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศเยอรมนีโดย วอลเตอร์ บรุค (Dr. Walter Bruch) ระบบ PAL หรือเรียกว่าระบบ CCIR (Consultative Committee on International Radio) เป็นระบบที่ปรับปรุงมาจากระบบ NTSC โดยปรับปรุงเรื่องความผิดพลาดของสีที่เกิดจากเฟสที่เปลี่ยนไปมา โดยมีวิธีการแก้ไขคือเพิ่มเฟสเข้าไป 180 องศาเป็นระบบที่มีการส่ง 625 เส้น 25 ภาพต่อวินาที ซึ่งหลักการของระบบนี้จะเหมือนกันกับหลักการของระบบ NTSC [3]
- ระบบ SECAM (Sequential Color with Memory) ระบบ SECAM ได้ถูกคิดค้นโดยเฮนรี เดอร์ เฟรนซ์ (Henri de France) นักวิจัยชาวฝรั่งเศส ระบบนี้เป็นระบบที่มีการส่ง 625 เส้น 25 ภาพต่อวินาที หลักการของระบบนี้คือ แยกส่งสัญญาณกำหนดความแตกต่างของสีสลับกันที่ละเส้น ในเครื่องรับจะจับสัญญาณไว้ชุดหนึ่งเพื่อรวมกับสัญญาณในเส้นถัดไปทำให้ได้ภาพสีที่ต้องการส่ง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ระบบการส่งสัญญาณของโทรทัศน์ดิจิทัล

เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้ามากขึ้นจึงได้มีการนำระบบคอมพิวเตอร์มาใช้พัฒนาระบบสัญญาณโทรทัศน์จากเดิมที่มีการรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ในระบบแอนะล็อกให้เป็นการรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ในระบบดิจิทัล ซึ่งจะทำให้ได้ภาพและเสียงที่ดีกว่าระบบแอนะล็อก เช่น ระบบโทรทัศน์ความคมชัดสูง (High-definition television; HDTV) [6]

ซึ่งระบบการส่งสัญญาณในระบบดิจิทัลสำรวจมีระบบหลัก ๆ ได้แก่ (พ.ศ. 2550)

- Advance Television Systems Committee (ATSC) เป็นระบบที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา
- Digital Video Broadcasting (DVB) เป็นระบบที่ใช้ในยุโรป
- Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB) เป็นระบบที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่น [6]

การทำงานของโทรทัศน์ดิจิทัลนี้สัญญาณดิจิทัลมีการส่งข้อมูลที่มากกว่าแบบ แอนะล็อก จึงต้องมีการบีบอัดสัญญาณก่อนออกอากาศ โดยมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณ คือ การบีบอัดแบบ MPEG-2 ซึ่งการทำงานของ MPEG-2 จะทำการบันทึกเฉพาะ ภาพที่เปลี่ยนไปจากเดิม เช่น ภาพจรวดกำลังเคลื่อนที่ขึ้นไปในอวกาศ ก็จะทำบันทึกเฉพาะการเคลื่อนที่ของจรวดเท่านั้น ฉากหลังที่เป็นอวกาศเหมือนเดิมจะถูกบันทึกเพียงครั้งแรกครั้งเดียว การบีบอัดสัญญาณสามารถบีบอัดได้ในอัตราส่วน 55 ต่อ 1 โดยที่คุณภาพของสัญญาณดีกว่าและระยะทางการส่งไกลกว่าระบบแอนะล็อก [7] เป็นต้น

### 3.2.4 การส่งสัญญาณโทรทัศน์

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นโทรทัศน์มีรายละเอียด ดังนี้

- การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน
- การแพร่กระจายสัญญาณไปในอวกาศเมื่อติดตั้งเสาอากาศแล้วต่อสายสัญญาณเข้าเครื่องรับก็สามารถรับสัญญาณโทรทัศน์จากสถานีส่งได้ การส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุส่งได้ในช่วงความถี่ 30-300 MHz จะเป็นช่วงคลื่นความถี่สูงมาก (Very high Frequency; VHF) และช่วงความถี่ 300-3000 MHz จะเป็นช่วงของคลื่นความถี่สูง (Ultra high Frequency; UHF) [8]
- การส่งสัญญาณโทรทัศน์ผ่านช่องนำสัญญาณ
- การส่งสัญญาณไปตามสายหรือช่องนำสัญญาณหรือสายเคเบิลไปยังเครื่องรับโทรทัศน์ ซึ่งเป็นการติดต่อโดยตรงระหว่างสถานีส่งกับผู้รับสัญญาณ ซึ่งต่างจากการแพร่กระจายคลื่นด้วยความถี่วิทยุที่ไม่จำกัดผู้รับ การส่งสัญญาณนี้จะผ่านสายนำสัญญาณพิเศษแบ่งออกเป็น การส่งสัญญาณผ่านสายหรือความถี่เฉพาะชุมชน การส่งสัญญาณผ่านดาวเทียมทั้งที่แพร่กระจายคลื่นทั่วไปและบอกรับสมาชิกและโทรทัศน์ผ่านอินเทอร์เน็ต (Internet Protocol television; IPTV) เป็นต้น

### 3.2.5 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ในประเทศไทย

ณ ปีพ.ศ. 2550 ประเทศไทยใช้ระบบโทรทัศน์ PAL ซึ่งแบ่งแถบคลื่นความถี่ของการใช้งานโทรทัศน์ออกเป็นย่านความถี่ VHF และ ความถี่ UHF โดยที่ย่านความถี่ VHF ได้ถูกใช้จนเต็มแล้ว ดังนั้นสถานีโทรทัศน์ที่จัดตั้งขึ้นมาใหม่จึงต้องส่งสัญญาณโทรทัศน์ในย่านความถี่ UHF แถบคลื่นความถี่ของความถี่การใช้งานโทรทัศน์ได้แสดงตามตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ย่านความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ในประเทศไทย

ย่านความถี่	ความถี่
ช่อง 2-6	VHF 41-68 MHz
สถานีวิทยุ F.M.	VHF 88-108 MHz
ช่อง 7-13	VHF 174-230 MHz
ช่อง 14-69	UHF 470-806 MHz

### 3.3 โทรทัศน์ระบบดิจิทัล [9]

โทรทัศน์ระบบดิจิทัล หรือ โทรทัศน์ดิจิตอล (Digital television) คือการส่งผ่านของเสียงและวิดีโอโดยสัญญาณดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งความคมชัดของภาพและเสียง การส่งข้อมูลแบบนี้สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าแบบแอนะล็อกในหนึ่งช่องสัญญาณ จึงเรียกได้อีกชื่อว่า Multicasting การส่งสัญญาณเป็นแบบดิจิทัลจึงทำให้ได้คุณภาพของภาพและเสียงดีกว่าด้วย เช่น โทรทัศน์ระบบ HDTV ตรงกันข้ามแอนะล็อกก็ใช้กับสัญญาณโทรทัศน์แอนะล็อก หลายประเทศจะเปลี่ยนการรับสัญญาณโทรทัศน์จากระบบแอนะล็อกเป็นโทรทัศน์ระบบดิจิทัล เพื่อออกอากาศโทรทัศน์แบบอะนาล็อกได้ จึงใช้วิทยุคลื่นความถี่เดิมโทรทัศน์แต่เดิมใช้ระบบแอนะล็อกหรือเชิงเส้นทั้งในภาคการส่งสัญญาณและภาครับสัญญาณ แต่ต่อมาเมื่อระบบคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างกว้างขวางขึ้น จึงได้มีการนำระบบคอมพิวเตอร์นำมาพัฒนาใช้ในการช่วยโทรทัศน์ แต่ต่อมาได้มีผู้เล็งเห็นว่าหากนำเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์มาผสมผสานกับเทคโนโลยีของโทรทัศน์ คงจะเป็นประโยชน์อย่างมหาศาล คอมพิวเตอร์นั้นใช้ส่งสัญญาณและรับสัญญาณในระบบดิจิทัล ดังนั้น จึงได้ปรับปรุงโทรทัศน์ให้ใช้ระบบดิจิทัลด้วย เนื่องจากโทรทัศน์ใช้กันทั่วโลก การเปลี่ยนระบบจากแอนะล็อกเป็นระบบดิจิทัล จึงต้องเปลี่ยนทั่วโลก ซึ่งคณะกรรมการสหภาพโทรคมนาคมสากล (ITU) กำลังประชุมกันอยู่ โดยกำหนดมาตรฐานดังนี้ 1.ระบบแพร่ภาพดิจิทัลผ่านดาวเทียม (DVB-S The Digital Video Broadcasting Satellite System) 2.ระบบแพร่ภาพดิจิทัลผ่านสายเคเบิล (DVB-C the digital cable delivery system) และ 3. ระบบแพร่ภาพดิจิทัลภาคพื้นดิน (DVB-T the Digital Terrestrial Television System)

#### 3.3.1 กลไกการทำงานของโทรทัศน์ระบบดิจิทัล

เป็นระบบการรับส่งสัญญาณภาพและเสียงที่มีข้อมูลที่มีการเข้ารหัสเป็นดิจิทัล ที่มีค่า “0” กับ “1” เท่านั้น โดยมีกระบวนการต่าง ๆ ที่จะทำให้การแปลงสัญญาณภาพและเสียงให้เป็น ดิจิตอล มีการบีบอัดข้อมูล ทำการเข้ารหัสข้อมูล ก่อนที่จะทำการมอดูเลตข้อมูลดิจิทัลเหล่านี้เพื่อส่งผ่านตัวกลางไปสู่ผู้รับปลายทาง ซึ่งต่างกันอย่างสิ้นเชิงกับโทรทัศน์ระบบแอนะล็อก เมื่อสัญญาณดิจิทัลถูกส่งมายังเครื่องรับโทรทัศน์ จะผ่านกระบวนการบีบอัดข้อมูลสัญญาณดิจิทัล โดย MPEG-2 หรือ MPEG-4 ทำการถอดรหัส หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังหลอดภาพ แล้วหลอดภาพจะยิงลำแสงออกไปยังหน้าจอโทรทัศน์ ทำให้เกิด Pixel (จุดภาพ) บนจอภาพ ซึ่งในระบบ HDTV นั้นจะให้ภาพที่มีความละเอียดของ Pixel สูงกว่าโทรทัศน์ทั่วไปมาก จึงทำให้ภาพที่ออกมามีความคมชัด ละเอียด และไม่มีการกระพริบของสัญญาณภาพ ลักษณะการยิงลำแสง แบ่งได้ 2 แบบ คือ Interlaced Scanning และ Progressive Scanning

- 480i/576i (SDTV) เป็นสัญญาณโทรทัศน์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เป็นแบบดิจิทัล

- 480p/576p (EDTV) เป็นโทรทัศน์ที่มีความชัดเจนเพิ่มขึ้น (Enhanced Definition Television) หรือ EDTV ที่ให้ภาพชัดเจนใกล้เคียงกับ HDTV ซึ่งดีกว่าที่รับชมกันในขณะนี้และทุกวันนี้สามารถ เล่นแผ่นดีวีดีทั้งหมดกับ EDTV ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 720p (HDTV) เป็น HDTV format ที่ให้คุณภาพใกล้เคียงกับ 1080i แต่ก็ยอมให้ส่งสัญญาณ 480p ได้ด้วย
- 1080i (HDTV) เป็น HDTV image ที่มีคุณภาพของภาพที่คมชัดซึ่งเป็นแบบที่ผู้ให้บริการโทรทัศน์ใช้อยู่

### 3.3.2 การพัฒนาโทรทัศน์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Television)

ในขณะที่โทรทัศน์จากดาวเทียมขยายกิจการมากขึ้น มีการถ่ายทอดข้ามโลกและครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น ทางเคเบิลทีวีก็พัฒนาระบบมากขึ้น มีการให้บริการมากขึ้น ทางโทรทัศน์ที่ส่งด้วยสายอากาศภาคพื้นดิน ก็ต้องขยับตัวเพราะต้องการช่องสัญญาณมากขึ้น การพัฒนาโทรทัศน์ภาคพื้นดินนั้นมีความพยายามที่จะเพิ่มสถานีโทรทัศน์ให้มากขึ้นโดยการใช้ช่องสัญญาณความถี่ในย่านยูเอชเอฟ นอกจากนั้นยังมีความพยายามทำโทรทัศน์ให้มีความคมชัดมากขึ้น และมีรายละเอียดมากขึ้นที่เรียกว่า เอชดีทีวี (HDTV) แต่ก็ต้องเลิกล้มไปเพราะเห็นว่าระบบที่พัฒนานั้นเป็นระบบอนาล็อก ซึ่งจะพัฒนาต่อไปก็คงยากจึงหันมาพัฒนาโทรทัศน์ HDTV ในระบบดิจิทัลแทน

### 3.3.3 การส่งโทรทัศน์ในระบบดิจิทัล (Digital)

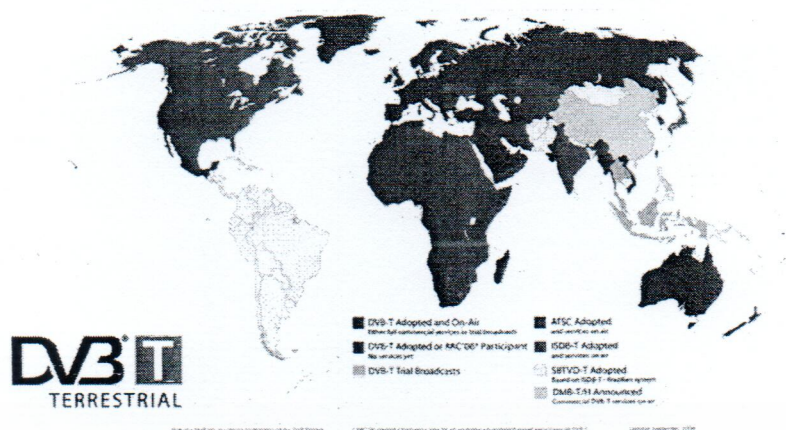
เดิมที่การส่งโทรทัศน์จะส่งในระบบแอนะล็อก แต่เมื่อมีสถานีส่งโทรทัศน์มากขึ้นก็เกิดปัญหาการรบกวนเกิดขึ้น เพราะความถี่มีจำนวนจำกัด การส่งโทรทัศน์ในระบบแอนะล็อกนั้น ในเมืองเดียวกันจะส่งความถี่ใกล้เคียงกันไม่ได้ ต้องส่งช่องเว้นช่อง เช่นใน กทม. ส่งช่อง 3 5 7 9 11 จะส่งช่อง 2 4 6 8 10 12 ไม่ได้ ถ้าจะส่งช่อง 2 4 6 8 10 12 จะต้องส่งให้ห่างจาก กทม. อย่างน้อย 200 กม. เช่นที่ นครสวรรค์ ระยอง หรือ ประจวบคีรีขันธ์ นอกจากนี้ยังมีปัญหาอื่น ๆ อีก อาทิ

- สัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กอื่น ๆ ทำให้ภาพไม่คมชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่องต่ำ
- สัญญาณที่ส่งมาจากสถานีวิทยุหรือโทรทัศน์อื่น ๆ มารบกวนทำให้รับไม่คมชัด
- สัญญาณที่สะท้อนจากตึก สิ่งปลูกสร้าง หรือภูเขาทำให้เกิดเงาที่จอเครื่องรับโทรทัศน์ ทำให้ได้รับไม่ ชัดเจนและน่ารำคาญ
- เนื่องจากไม่สามารถบีบอัดสัญญาณได้ จึงต้องใช้ความถี่มากทำให้มีสถานีได้น้อย
- การที่จะส่งสัญญาณอื่น ๆ รวมไปด้วยทำได้โดยยาก

ยังมีเหตุผลอื่น ๆ อีก แต่เหตุผลที่สำคัญคือ การมีช่องสัญญาณน้อยไม่พอใช้ จึงต้องนำระบบดิจิทัล มาแก้ปัญหาเพื่อให้มีช่องสัญญาณออกอากาศรายการได้มากขึ้น

## 3.4 DVB – T

DVB - T เป็นคำย่อของ Digital Video Broadcasting – Terrestrial [10]-[11] เป็นมาตรฐานที่สมาคม DVB ยุโรป ใช้สำหรับการส่งสัญญาณออกอากาศของโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน ที่ออกอากาศครั้งแรกในสหราชอาณาจักรในปี 1998 ระบบนี้ส่งบีบอัดระบบเสียงดิจิทัลวีดีโอและข้อมูลอื่น ๆ ในรูปแบบ MPEG โดยใช้การเข้ารหัสการมอดูเลตแบบ Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (COFDM หรือ OFDM)



ภาพที่ 3.4 การส่งสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลของภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วโลก

จากภาพที่ 3.4 แสดงถึงการแพร่ภาพโทรทัศน์ในระบบดิจิทัล [12] โดยแบ่งออกเป็น 4 ประเภทได้แก่

#### 3.4.1 DVB (Digital Video Broadcasting)

พัฒนาในทวีปยุโรป ระบบ DVB-T แพร่หลายใน Europe, Australia, New Zealand, Colombia, Uruguay and some countries of Africa

#### 3.4.2 ATSC (Advanced TV System Committee) หรือ 8VSB (Vestigial Sideband)

พัฒนาโดยอเมริกา โดย FCC ( Federal Communication Commission ) แพร่หลายใน North America และ South Korea

#### 3.4.3 ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting)

พัฒนาโดยประเทศญี่ปุ่น NHK โดยเป็นมาตรฐาน Digital Broadcasting Expert Group (DiBEG) ระบบ ISDB-T แพร่หลายในญี่ปุ่นและบราซิล

#### 3.4.4 DMB (Digital Media Broadcasting)

เป็นระบบที่ประเทศต่างๆพัฒนาขึ้นมาใช้เอง เช่น ประเทศจีนพัฒนาระบบ DMB-H/T/C, เกาหลีใต้พัฒนาระบบ DMB-T, ญี่ปุ่นพัฒนาระบบ DMB-S และใช้งานแพร่หลายในจีน และฮ่องกง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ทฤษฎีและการออกแบบวงจรความถี่

#### 4.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน










ในเนื้อหาส่วนแรกของเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงรายการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่นำมาสร้างวงจรความถี่ ซึ่งจะอธิบายถึงรายละเอียด การนำไปใช้งาน และคุณสมบัติคร่าว ๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.1.1 ตัวต้านทาน (Resistor) [14]

ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่นวงจรเครื่องรับวิทยุ โทรทัศน์ เครื่องขยายเสียง ฯลฯ เป็นต้น ตัวต้านทานที่ต่ออยู่ในวงจรไฟฟ้า ทำหน้าที่ลดแรงดัน และจำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร ตัวต้านทานมีรูปแบบและขนาดแตกต่างกันตามลักษณะของการใช้งาน นอกจากนี้ยังแบ่งออกเป็นชนิดค่าคงที่และชนิดปรับค่าได้

ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้กระแสและแรงดันภายในวงจรได้ขนาดตามที่ต้องการ สัญลักษณ์ของตัวต้านทานที่ใช้ในการเขียนวงจรมีอยู่หลายแบบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของตัวต้านทาน [15]

	Resistor (IEEE)	Resistor reduces the current flow.
	Resistor (IEC)	
	Potentiometer (IEEE)	Adjustable resistor - has 3 terminals.
	Potentiometer (IEC)	
	Variable Resistor / Rheostat (IEEE)	Adjustable resistor - has 2 terminals.
	Variable Resistor / Rheostat (IEC)	
	Trimmer Resistor	Preset resistor
	Thermistor	Thermal resistor - change resistance when temperature changes
	Photoresistor / Light dependent resistor (LDR)	Photo-resistor - change resistance with light intensity change

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ชนิดของตัวต้านทาน

ตัวต้านทานที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ในกรณีที่แบ่งโดยยึดเอาค่าความต้านทานเป็นหลักจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- 1) ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ (Fixed Resistor)
- 2) ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Adjustable Resistor)
- 3) ตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistor)

❖ ตัวต้านทานแบบค่าคงที่

ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่มีหลายประเภท ที่นิยมในการนำมาประกอบใช้ในวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมีดังนี้

- 1) ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition)
- 2) ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ (Metal Film)
- 3) ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน (Carbon Film)
- 4) ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire Wound)
- 5) ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา (Thick Film Network)
- 6) ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มบาง (Thin Film Network)

- ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition)

เป็นตัวต้านทานที่นิยมใช้กันแพร่หลายมาก มีราคาถูก โครงสร้างทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานผสมกันระหว่างผงคาร์บอนและผงของฉนวน อัตราส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้จะทำให้ค่าความต้านทานมีค่าน้อยเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ บริเวณปลายทั้งสองด้านของตัวต้านทานต่อด้วยลวดตัวนำ บริเวณด้านนอกของตัวต้านทานจะฉาบด้วยฉนวน

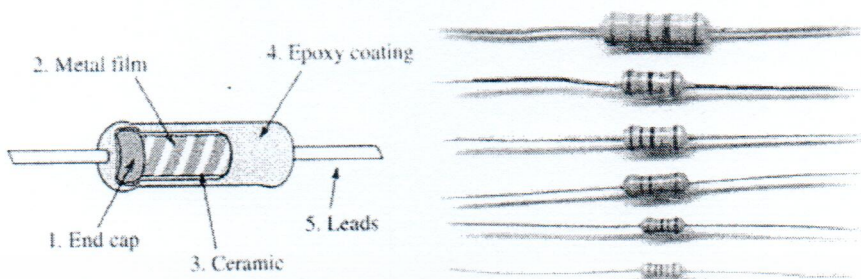


ภาพที่ 4.1 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม

- ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ (Metal Film)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะทำมาจากแผ่นฟิล์มบางของแก้วและโลหะหลอมเข้าด้วยกันแล้วนำไปเคลือบที่เซรามิค ทำเป็นรูปทรงกระบอก แล้วตัดแผ่นฟิล์มที่เคลือบออกให้ได้ค่าความต้านทานตามที่ต้องการ ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการเคลือบด้วยสารอีพ็อกซี (Epoxy) ตัวต้านทานชนิดนี้มีค่าความผิดพลาดบวกลบ 0.1% ถึงประมาณบวกลบ 2% ซึ่งถือว่ามีค่าความ

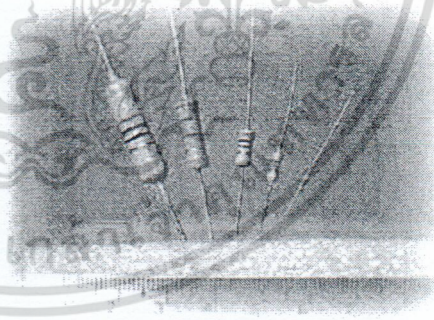
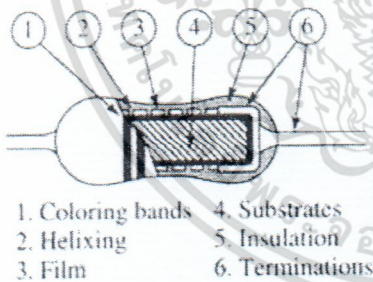
ผิดพลาดน้อยมาก นอกจากนี้ยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากภายนอกได้ดี สัญญาณรบกวนน้อยเมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่น ๆ



ภาพที่ 4.2 ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ

- ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน (Carbon Film)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน เป็นตัวต้านทานแบบค่าคงที่โดยการฉาบผงคาร์บอนลงบนแท่งเซรามิกซึ่งเป็นฉนวน หลังจากที่ทำกรเคลือบแล้วจะตัดฟิล์มเป็นวงแหวนเหมือนเกลียวน็อต ในกรณีที่เคลือบฟิล์มคาร์บอนในปริมาณน้อยจะทำให้ได้ค่าความต้านทานสูง แต่ถ้าเพิ่มฟิล์มคาร์บอนในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าความต้านทานต่ำ ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะมีค่าความผิดพลาด บวกลบ 5% ถึง บวกลบ 20% ทนกำลังวัตต์ตั้งแต่ 1/8 วัตต์ ถึง 2 วัตต์ มีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 Ω ถึง 100 MΩ

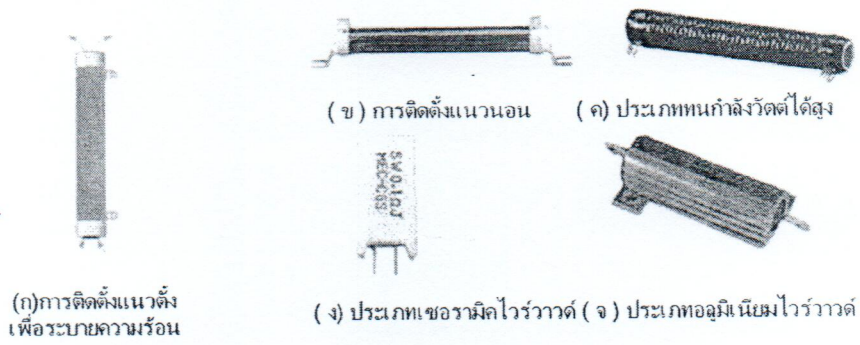


ภาพที่ 4.3 ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

- ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire Wound)

โครงสร้างของตัวต้านทานแบบนี้เกิดจากการใช้ลวดพันลงบนเส้นลวดแกนเซรามิก หลังจากนั้นต่อลวดตัวนำด้านหัวและท้ายของเส้นลวดที่พัน ส่วนค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเป็นลวดตัวนำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเซรามิกและความยาวของลวดตัวนำ ขั้นตอนสุดท้ายจะเคลือบด้วยสารประเภทเซรามิกบริเวณรอบนอกอีกครั้งหนึ่ง ค่าความต้านทานของตัวต้านทานแบบนี้จะมีค่าต่ำเพราะต้องการให้มีกระแสไหลได้สูง ทนความร้อนได้ดี สามารถระบายความร้อนโดยใช้อากาศถ่ายเท

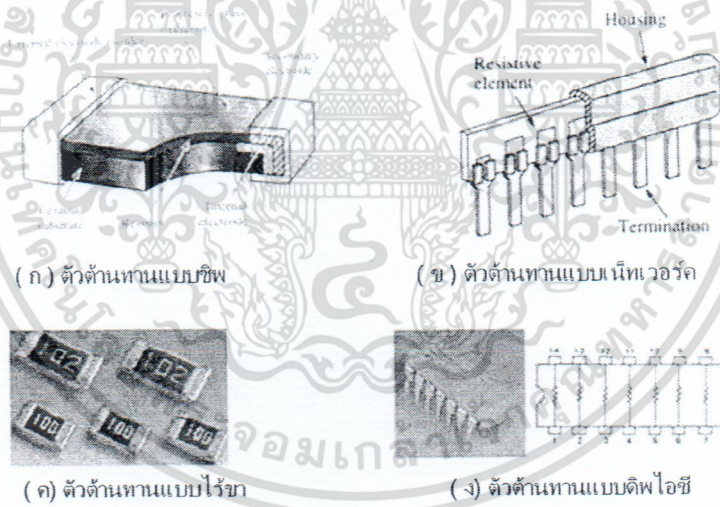
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์

- ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา ( Thick Film Network)

โครงสร้างของตัวต้านทานแบบนี้ทำมาจากแผ่นฟิล์มหนา มีรูปแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนาประเภทไร้ขา (Chip Resistor) ตัวต้านทานแบบนี้ต้องใช้เทคโนโลยี SMT (Surface Mount Technology) ในการผลิต มีอัตราทนกำลังประมาณ 0.063 วัตต์ ถึง 500 วัตต์ ค่าความคลาดเคลื่อนบวกลบ 1% ถึง บวกลบ 5%

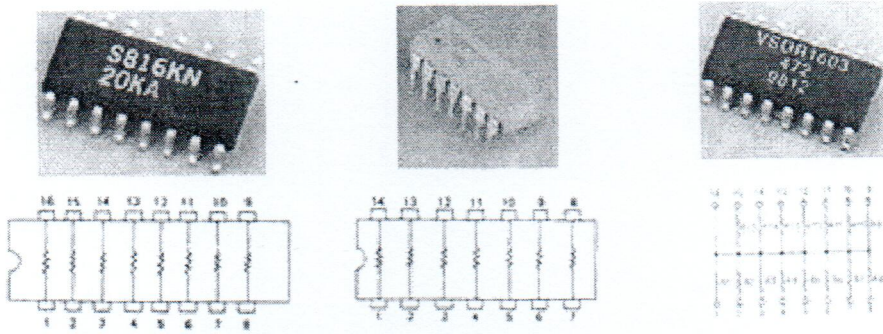


ภาพที่ 4.5 ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา

- ตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มบาง (Thin Film Network)

โครงสร้างของตัวต้านทานแบบนี้ทำมาจากแผ่นฟิล์มบาง มีลักษณะรูปร่างเหมือนกับตัวไอซี (Integrate Circuit) ใช้เทคโนโลยี SMT (Surface Mount Technology) ในการผลิตเช่นเดียวกับตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา โดยส่วนใหญ่จะมีขาทั้งหมด 16 ขา การใช้งานต้องบัดกรีเข้ากับแผ่นลายวงจร อัตราทนกำลัง 50 มิลลิวัตต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนบวกลบ 0.1% และอัตราทนกำลัง 100 มิลลิวัตต์ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนบวกลบ 5% ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 50 VDC

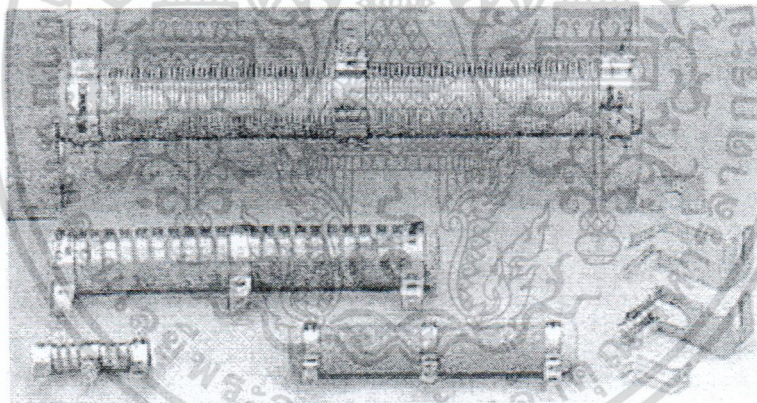
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 รูปร่างและสัญลักษณ์ของตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มบาง

❖ ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

โครงสร้างของตัวต้านทานแบบนี้ทำมาจากแผ่นฟิล์มบาง มีลักษณะรูปร่างเหมือนกับตัวไอซี (Integrate Circuit) ใช้เทคโนโลยี SMT (Surface Mount Technology) ในการผลิตเช่นเดียวกับตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา โดยส่วนใหญ่จะมีขาทั้งหมด 16 ขา การใช้งานต้องบัดกรีเข้ากับแผ่นลายวงจร อัตราทนกำลัง 50 มิลลิวัตต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนบวกลบ 0.1% และอัตราทนกำลัง 100 มิลลิวัตต์ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนบวกลบ 5% ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 50 VDC

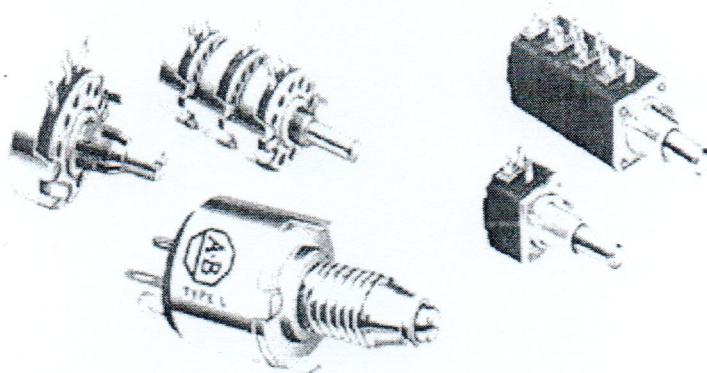


ภาพที่ 4.7 ลักษณะรูปร่างของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

❖ ตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้

ตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistor) โครงสร้างภายในทำมาจากคาร์บอนเซรามิก หรือพลาสติกตัวนำ ใช้ในงานที่ต้องการเปลี่ยนค่าความต้านทานบ่อย ๆ เช่น ในเครื่องรับวิทยุ, โทรทัศน์ เพื่อปรับลดหรือเพิ่มเสียง, ปรับลดหรือเพิ่มแสงในวงจรหรี่ไฟ มีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น โปเทนซิโอมิเตอร์ (Potentiometer) หรือพอด (Pot) สำหรับชนิดที่มีแกนเลื่อนค่าความต้านทานหรือแบบที่มีแกนหมุนเปลี่ยนค่าความต้านทานคือโวลุ่ม (Volume) เพิ่มหรือลดเสียงมีหลายแบบให้เลือกคือ 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น เป็นต้น ส่วนอีกแบบหนึ่งเป็นแบบที่ไม่มีแกนปรับโดยทั่วไปจะเรียกว่า โวลุ่มเกือกม้า หรือทิมพอด (Trim pot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

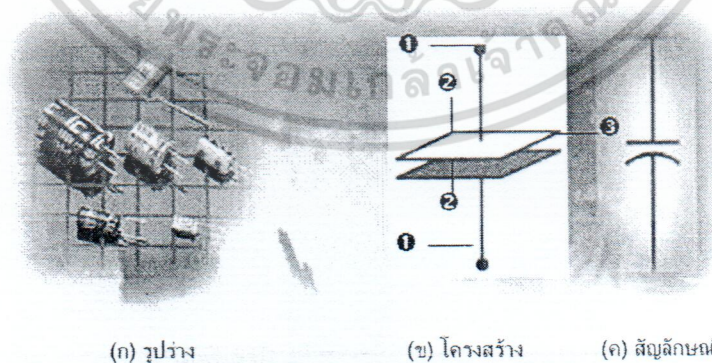


ภาพที่ 4.8 ลักษณะรูปร่างของตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้

#### 4.1.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor) [16]

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้ นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่น วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรผ่านสัญญาณ (By-pass) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) ฯลฯ เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แบบค่าคงที่ แบบเปลี่ยนแปลงค่าได้ และแบบเลือกค่าได้ ตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนเดนเซอร์หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (Farad)

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้โดยนำสารตัวนำ 2 ชั้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกัน ระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งไดอิเล็กตริกนี้อาจจะเป็นอากาศ ไมก้า พลาสติก เซรามิกหรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวนอื่น ๆ เป็นต้น โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแสดงดังภาพที่ 4.9

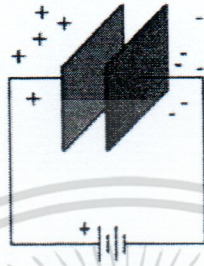


ภาพที่ 4.9 รูปร่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

จากภาพที่ 4.9 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ โดยที่ (1) หมายถึงจุดที่ต่อใช้งานกับวงจร (2) หมายถึงสารตัวนำที่เป็นแผ่นเพลท (3) หมายถึงฉนวน ในที่นี้คืออากาศ ความจุทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าเกิดจากการป้อนแรงเคลื่อนให้กับขั้วทั้งสองของจุดที่ต่อใช้งานของสารตัวนำซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสารตัวนำที่เป็นแผ่นเพลท จะทำให้เกิดค่าความจุทางไฟฟ้าขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่าการเก็บประจุ (Charge) เมื่อต้องการนำไปใช้งานเรียกว่าการคายประจุ (Discharge) ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นเพลทมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ส่วนค่าความจุทางไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) รายละเอียดดังกล่าวแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แสดงการเกิดความจุจากการป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้า

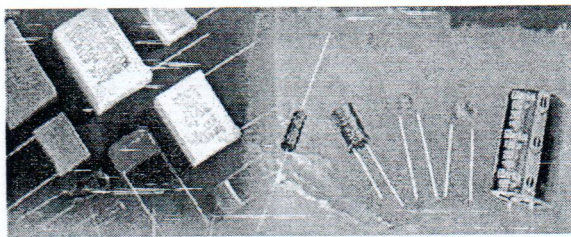
#### 4.1.4 ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีมากมาย เราสามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุตามลักษณะทางโครงสร้างหรือตามสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริก การแบ่งโดยใช้สารไดอิเล็กตริกเป็นวิธีการที่ค่อนข้างละเอียดเพราะว่าค่าไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวกำหนดค่าตัวเก็บประจุนั้น ๆว่าจะนำไปใช้งานในลักษณะใด ทนแรงดันเท่าใด แต่ถ้าหากแบ่งตามระบบเก่าที่เคยแบ่งกันมาจะสามารถแบ่งตัวเก็บประจุได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

- 1) ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor)
- 2) ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)
- 3) ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor)

##### ❖ ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor)

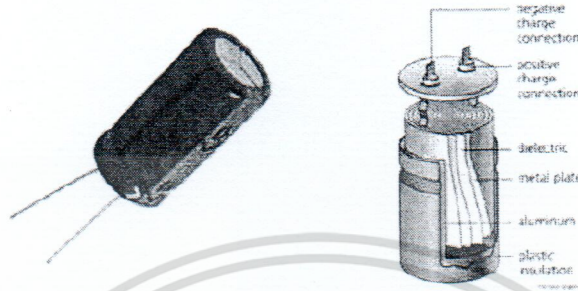
คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลมหรือเป็นทรงกระบอก ซึ่งมักแสดงค่าที่ตัวเก็บประจุ เช่น 5 พิโกฟารัด (pF) 10 ไมโครฟารัด (μF) แผ่นเพลทตัวนำมักใช้โลหะและมีไดอิเล็กตริกประเภท ไมก้า เซรามิก อิเล็กโตรไลติกคั่นกลาง เป็นต้น การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลติก ชนิดเซรามิก ชนิดไมก้า เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่มีใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปมีดังนี้คือ



ภาพที่ 4.11 ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่

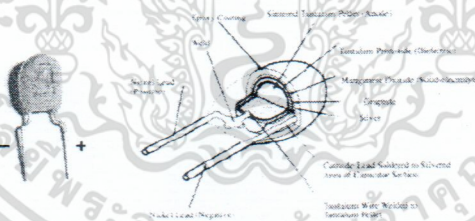
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชนิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Capacitor) เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ค่าความจุสูง มีขั้วบวกลบ เวลาใช้งานต้องติดตั้งให้ถูกขั้ว โครงสร้างภายในคล้ายกับแบตเตอรี่ นิยมใช้กับงานความถี่ต่ำหรือใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง มีข้อเสียคือกระแสรั่วไหลและความผิดพลาดสูงมาก



ภาพที่ 4.12 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์

- ชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์ (Tantalum Electrolyte Capacitor) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความผิดพลาดน้อยใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มักจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์แทนชนิดอิเล็กโทรไลต์ธรรมดา เพราะให้ค่าความจุสูงเช่นกัน โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นตัวนำที่ทำมาจากแทนทาลัมและแทนทาลัมเปอร์ออกไซด์อีกแผ่น นอกจากนี้ยังมีแมงกานีสไดออกไซด์ เงิน และเคลือบด้วยเรซิน ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์

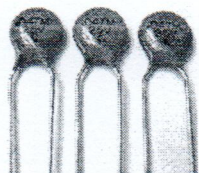
- ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Capacitor) นิยมใช้กันมากในวงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องขยายเสียง เป็นตัวเก็บประจุจำพวกเดียวกับชนิดอิเล็กโทรไลต์ แต่ไม่มีขั้วบวกลบ บางครั้งเรียกสั้น ๆ ว่า ไบแคป



ภาพที่ 4.14 ตัวเก็บประจุชนิดไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าไม่เกิน 1 ไมโครฟารัด ( $\mu\text{F}$ ) นิยมใช้กันทั่วไปเพราะมีราคาถูก เหมาะสำหรับวงจรประเภทคัปปลิงความถี่วิทยุ ข้อเสียของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกคือมีการสูญเสียมาก



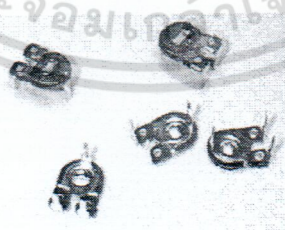
ภาพที่ 4.15 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก

- ชนิดไมลาร์ (Mylar Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่ามากกว่า 1 ไมโครฟารัด ( $\mu\text{F}$ ) เพราะฉะนั้นในงานบางอย่างจะใช้ไมลาร์แทนเซรามิก เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและการรั่วไหลของกระแสต่ำกว่าชนิดเซรามิก เหมาะสำหรับวงจรกรองความถี่สูง วงจรภาคไอเอฟของวิทยุ, โทรทัศน์ ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์จะมีตัวถังที่ใหญ่กว่าเซรามิกในอัตราทนแรงดันที่เท่ากัน



ภาพที่ 4.16 ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์

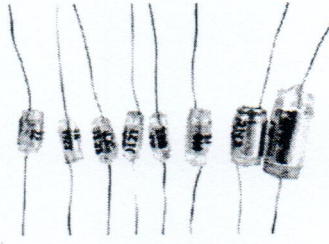
- ชนิดฟีดทรู (Feed-through Capacitor) ลักษณะโครงสร้างเป็นตัวถังทรงกลมมีขาใช้งานหนึ่งหรือสองขา ใช้ในการกรองความถี่รบกวนที่เกิดจากเครื่องยนต์มักใช้ในวิทยุรถยนต์



ภาพที่ 4.17 ตัวเก็บประจุชนิดฟีดทรู

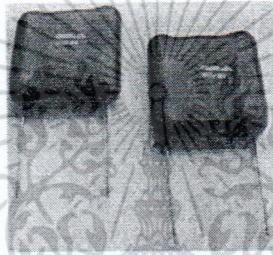
- ชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อยระดับนาโนฟารัด (nF) มีข้อดีคือให้ค่าการสูญเสียและกระแสรั่วไหลน้อยมาก นิยมใช้ในงานคัปปลิงความถี่วิทยุและวงจรจูนที่ต้องการความละเอียดสูง จัดเป็นตัวเก็บประจุระดับเกรด A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 ตัวเก็บประจุชนิดโพลีสไตรีน

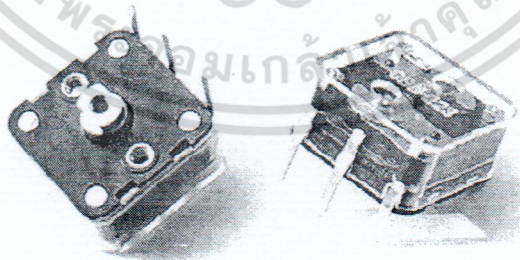
- ชนิดซิลเวอร์ไมก้า (Silver Mica Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่า 10 พิโกฟารัด (pF) ถึง 10 นาโนฟารัด (nF) เปรอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อย นิยมใช้กับวงจรความถี่สูง จัดเป็นตัวเก็บประจุนับเกรด A อีกชนิดหนึ่ง



ภาพที่ 4.19 ตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า

❖ ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)

ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วย แผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ ได้อิเล็กทริกที่ซีมีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น



ภาพที่ 4.20 ตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้อีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดีคือทริมเมอร์และแพดเดอร์ (Trimmer and Padder) โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ในกรณีที่ต้องการปรับค่าความจุ ให้ใช้ไขควงหมุนสลักตรงกลางค่าที่ปรับจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 pF ถึง 20 pF การเรียกชื่อตัว

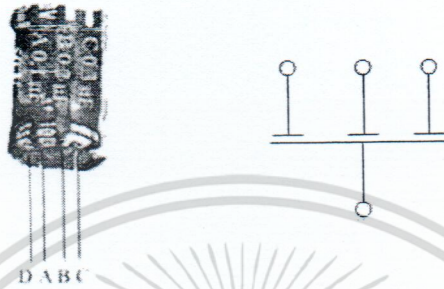
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บประจุแบบนี้ว่าทริมเมอร์หรือแพดเดอร์นั้นขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปต่อในลักษณะใด ถ้านำไปต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวอื่นจะเรียกว่า ทริมเมอร์ แต่ถ้านำไปต่ออนุกรมจะเรียกว่า แพดเดอร์

❖ **ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor)**

คือตัวเก็บประจุในตัวถังเดียว แต่มีค่าให้เลือกใช้งานมากกว่าหนึ่งค่าดังแสดงใน

ภาพที่ 4.21



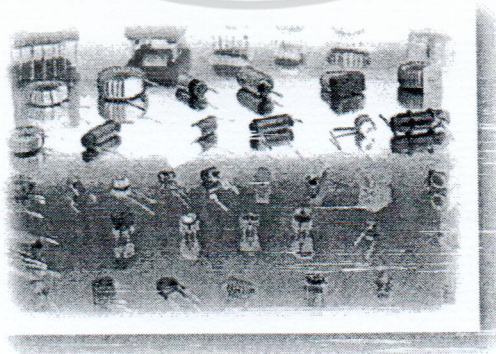
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้

4.1.5 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) [17]

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบค่าคงที่และแบบปรับค่าได้ ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry)

❖ **หลักการเบื้องต้นของตัวเหนี่ยวนำ**

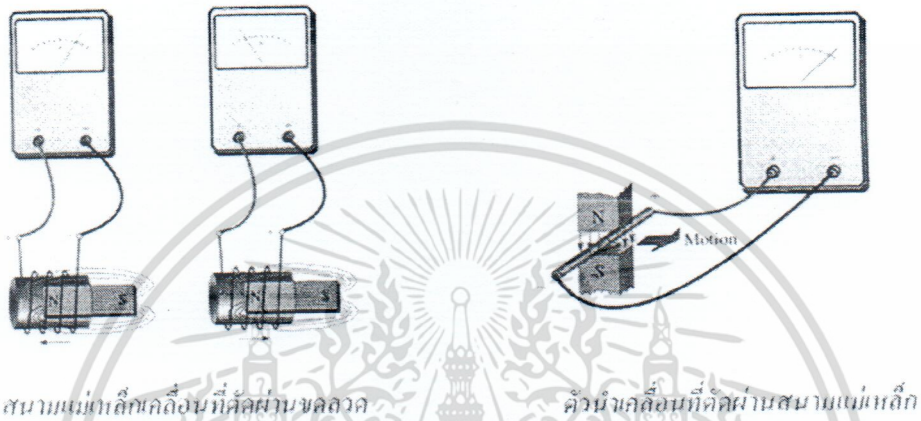
ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการปรับความถี่ของเครื่องรับวิทยุ และ โทรทัศน์โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดง นำมาขดหลาย ๆ รอบที่เรียกว่าคอย (Coil) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้แสดงคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ, แกนเหล็ก, หรือแกนเฟอร์ไรท์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ตัวเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆ

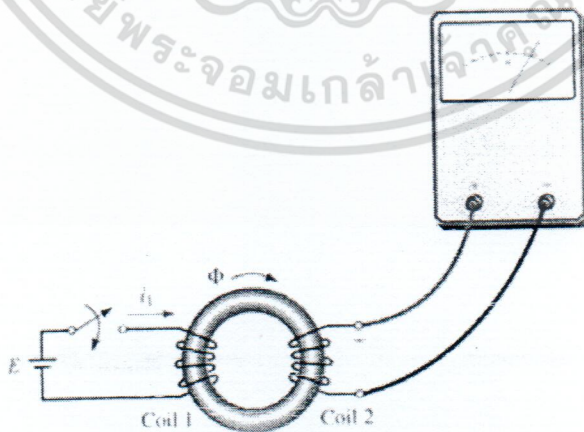
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองของไมเคิลฟาราเดย์ และเฮนรีเฮริตสรุปว่า สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวด ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันภายในขดลวด ถ้าต่อมิเตอร์แบบมีค่า 0 อยู่ตรงกลาง เข็มของมิเตอร์จะแสดงค่าเพิ่มขึ้นไปทางบวกหรือลดลงมาทางด้านลบ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก หรือในกรณีที่ใช้ตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน ถ้าเคลื่อนที่ไปทางขวา เข็มมิเตอร์ก็จะเบี่ยงเบนไปทางด้านบวก แต่ถ้าเคลื่อนที่ตัวนำไปทางด้านซ้าย เข็มมิเตอร์ก็จะเบี่ยงเบนกลับทิศทางไปยังด้านลบแสดงดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 หลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ

ในกรณีที่เราปิดสวิตช์เพื่อจ่ายแรงเคลื่อนให้แก่วงจรไฟฟ้าจะเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดชุดแรก (Coil 1) มีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันมายังขดลวด 2 (Coil 2) เข็มของมิเตอร์จะแสดงค่าเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่เปิดสวิตช์ทำให้วงจรต่อไม่ถึงกันจะมีผลทำให้เข็มของมิเตอร์แสดงค่าลดลงดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 แสดงการเหนี่ยวนำจากขดลวดชุดที่ 1 ไปยังขดลวดชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ❖ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

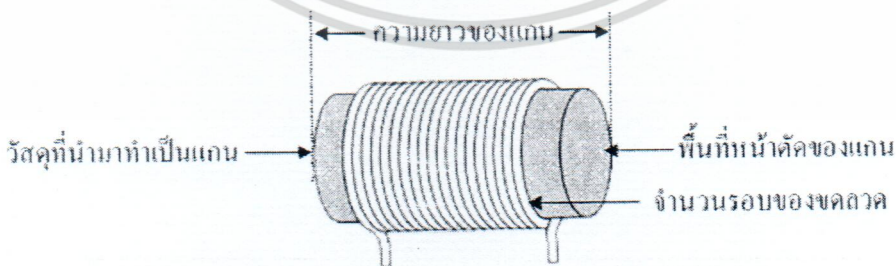
ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

- 1) จำนวนรอบของขดลวดเขียนแทนด้วยอักษร  $N$  ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
- 2) วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu$  วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ, เหล็ก, เฟอร์ไรท์, โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกัน ในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน
- 3) พื้นที่หน้าตัดของแกน เขียนแทนด้วยอักษร  $A$  ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
- 4) ความยาวของแกน เขียนแทนด้วยอักษร  $l$  ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน

จากปัจจัยทั้ง 4 ประการจึงสามารถหาสัมพันธของค่าความเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (4.1)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี  
 $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวดมีหน่วยเป็นรอบ  
 $\mu$  คือ วัสดุที่นำมาทำแกน  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนมีหน่วยเป็นตารางเมตร  
 $l$  คือ ความยาวแกนมีหน่วยเป็นเมตร



ภาพที่ 4.25 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.6 ไดโอด

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 2 ขา ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้ จึงสามารถนำไดโอดมาใช้เป็นตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง วงจรในภาครับของวิทยุ เป็นต้น

##### ❖ โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอด

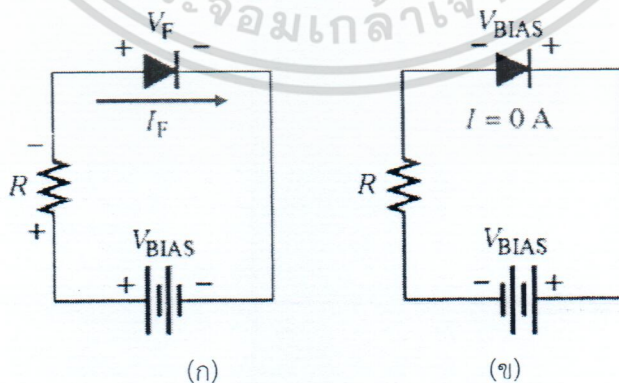
ไดโอดสามารถได้จากรอยต่อ p-n โดยการดึงขาที่ p-type เป็นขาแอโนด (Anode: A) และ n-type เป็นขาคะโทด (Cathode: K) สัญลักษณ์จะใช้ลูกศรแทนขาแอโนด โดยทิศทางของลูกศรเป็นทิศทางการไหลของกระแสสมมุติ (ตรงข้ามกับทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน) และใช้ขีดแทนขาคะโทด



ภาพที่ 4.26 โครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของไดโอด

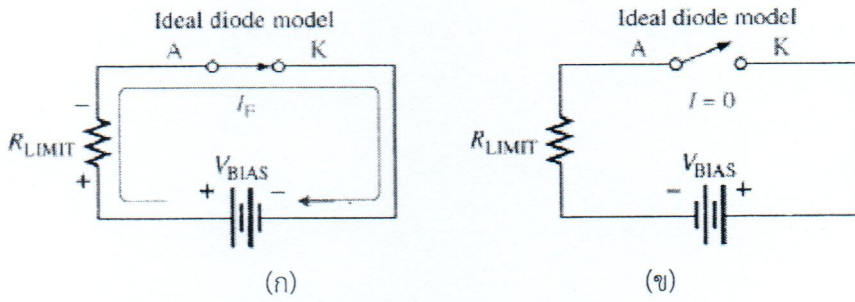
#### 4.1.7 ไดโอดออคุมคติ

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เราสามารถใช้แบบจำลองซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพื้นฐานมาแทนการทำงานของอุปกรณ์ที่เราพิจารณาอยู่ ภาพที่ 4.27 เป็นภาพแสดงการไบอัสไดโอดทั้งแบบไบอัสตรงและไบอัสกลับ ภาพที่ 4.27 (ก) แสดงการสวิตช์ปิดวงจรแทนไดโอดเมื่อได้รับไบอัสตรงและภาพที่ 4.27 (ข) ใช้สวิตช์เปิดวงจรแทนไดโอดเมื่อได้รับไบอัสกลับ



ภาพที่ 4.27 (ก) วงจรไดโอดแบบไบอัสตรงและ (ข) แบบไบอัสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.28 (ก) การสวิตช์ปิดวงจรแทนไดโอด และ (ข) การใช้สวิตช์เปิดวงจรแทนไดโอด สำหรับภาพที่ 4.27

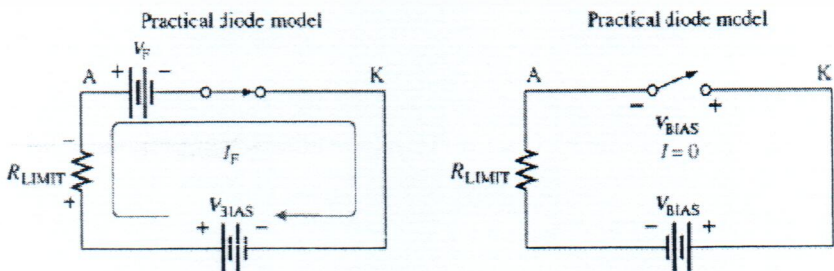
ภาพที่ 4.29 เป็นกราฟ V-I ของไดโอดอุดมคติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไดโอดอุดมคติไม่มีแรงดันตกคร่อมและความต้านทานเป็นศูนย์เมื่อไบอัสตรงและ ไดโอดอุดมคติมีกระแสรั่วไหลเป็นศูนย์และความต้านทานเป็นอนันต์เมื่อได้รับไบอัสกลับ



ภาพที่ 4.29 คุณสมบัติ V-I ของไดโอดอุดมคติ

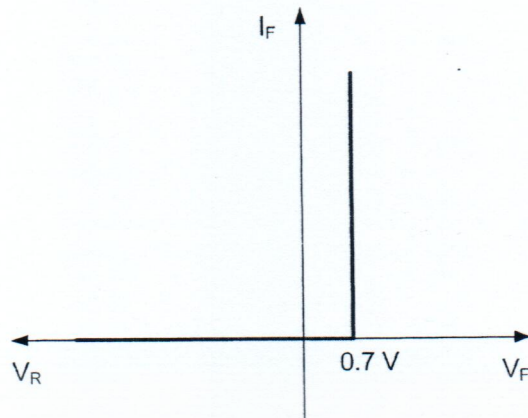
4.1.8 แบบจำลองไดโอดในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติเราสามารถพิจารณาไดโอดให้ใกล้เคียงยิ่งขึ้นด้วยการคำนึงถึงแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะไบอัสตรง โดยการแทนแรงดันตรงคร่อมด้วยสัญลักษณ์แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $V_F$  ดังภาพที่ 4.30 ซึ่งจะใช้ค่าแรงดัน 0.3 V สำหรับไดโอดที่ทำจาก Ge และ 0.7 V สำหรับไดโอดที่ทำจาก Si



ภาพที่ 4.30 คุณสมบัติจำลองไดโอดในทางปฏิบัติอย่างง่าย

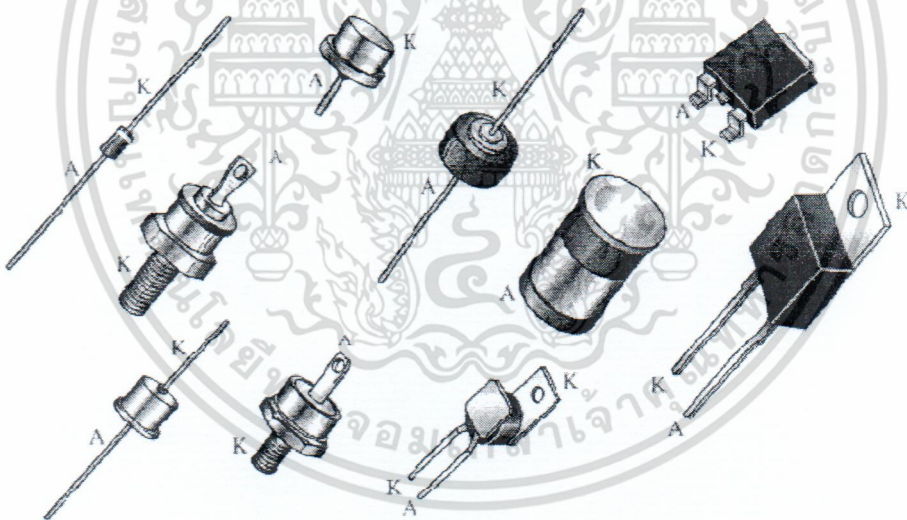
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.31 คุณสมบัติ V-I ของแบบจำลองอย่างง่ายของซิลิกอนไดโอด

#### 4.1.9 รูปร่างของไดโอด

รูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นตัวถังของไดโอดโดยทั่วไป ซึ่งมีอยู่หลายแบบ ขึ้นกับชนิด พิกัดกำลังไฟฟ้า ตัวถังของไดโอดบางชนิดสามารถสังเกตขาแคโทดได้ง่าย ๆ จากขีดที่แต้มไว้



ภาพที่ 4.32 รูปร่างของไดโอดชนิดต่าง ๆ

#### 4.1.10 ทรานซิสเตอร์ (Transistor) [18]

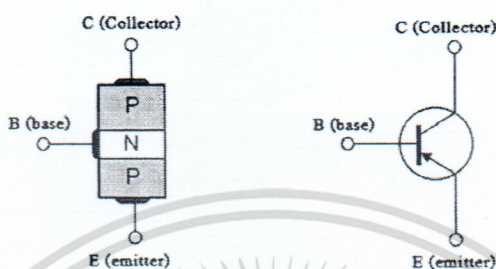
ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและถูกนำมาประกอบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มากมาย มีการนำทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงในวงจรเครื่องขยายเสียง ขยายสัญญาณโทรศัพท์ สัญญาณวิทยุ เป็นส่วนประกอบสำคัญในวงจรดิจิทัล เช่นวงจรรวม (Integrate circuit: IC) หน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ หน่วยประมวลผลกลาง หรือซีพียู (CPU) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.11 ชนิดของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัว โดยการนำสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นมาต่อกัน สามารถแบ่งออกได้ตามโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำที่นำมาต่อกันดังนี้

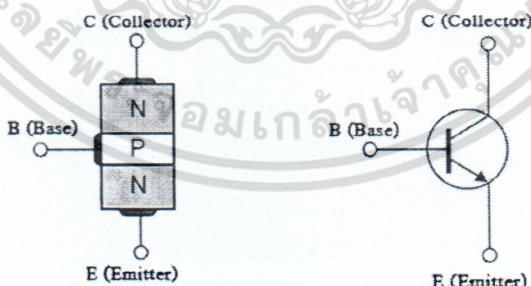
1) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP เป็นการนำสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นได้แก่ ชนิด P ชนิด N และ ชนิด P มาต่อเรียงกันตามลำดับ แล้วต่อขาออกมา 3 ขา ดังภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.33 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

ทรานซิสเตอร์เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขา 3 ขา แต่ละขาเรียกชื่อแตกต่างกันคือ ขาเบส (Base) หรือขา B ขาอีมิเตอร์ (Emitter) หรือขา E และขาคอลเลกเตอร์ (Collector) หรือ C โดยแต่ละขาจะมีหน้าที่การแตกต่างกันออกไป

2) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เป็นการนำสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นได้แก่ ชนิด N ชนิด P และ ชนิด N มาต่อเรียงกันตามลำดับแล้วต่อขาออกมา 3 ขา ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN มีโครงสร้างแตกต่างจากชนิด PNP ตรงที่การใช้สารกึ่งตัวนำชนิด N จำนวน 2 ชั้น ชนิด P จำนวน 1 ชั้น และสัญลักษณ์ก็มีความแตกต่างกันที่ขา อีมิเตอร์ (E) สัญลักษณ์หัวลูกศรจะพุ่งออกดังภาพที่ 4.34

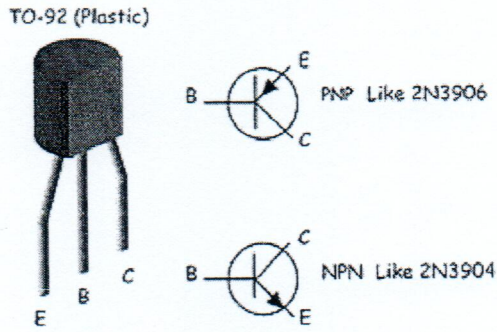


ภาพที่ 4.34 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

#### 4.1.12 รูปร่างและลักษณะของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ไม่ว่าจะเป็นชนิด PNP หรือ NPN จะมีรูปร่าง ๆ คล้ายกัน ขาต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ก็มีลักษณะคล้าย ๆ กัน การดูชนิดและลักษณะเบื้องต้น ของทรานซิสเตอร์นั้น เราจะดูจากคู่มือของบริษัทผู้ผลิต ดูจากวารสารต่าง ๆ ที่มีการผลิตออกมา ในปัจจุบันสามารถหาดูได้จากเว็บไซต์ในอินเทอร์เน็ต ตัวอย่างลักษณะของทรานซิสเตอร์แสดงได้ดังภาพที่ 4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



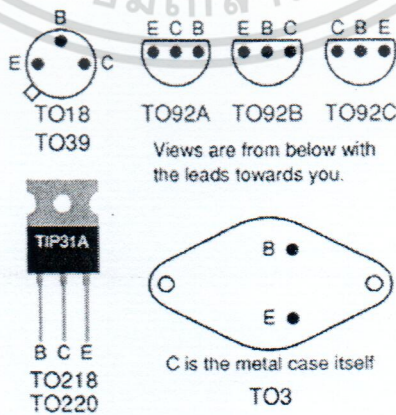
ภาพที่ 4.35 ลักษณะของทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N3906 และ 2N3904

สำหรับความหมายที่เกี่ยวข้องกับตัวทรานซิสเตอร์ที่ควรรู้ได้แก่

- 1) ลักษณะของตัวถัง หรือรูปร่างของทรานซิสเตอร์ จะระบุเป็นตัวอักษรและตัวเลข เช่น TO - 18, TO - 39 ดังตัวอย่างภาพที่ 4.36 และภาพที่ 4.37
- 2) เบอร์ของตัวทรานซิสเตอร์ จะระบุเป็นตัวอักษรและตัวเลข เช่น BC107, 2N3906 เป็นต้น
- 3) ตำแหน่งขา B, C, และ E ดังตัวอย่างรูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37



ภาพที่ 4.36 ลักษณะของทรานซิสเตอร์ตัวถัง TO18 เบอร์ BC107



ภาพที่ 4.37 ลักษณะตัวถังและตำแหน่งขาของทรานซิสเตอร์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit) [19]

วงจรกรองความถี่หรือฟิลเตอร์ (Filter) คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกลดทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร

วงจรกรองความถี่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

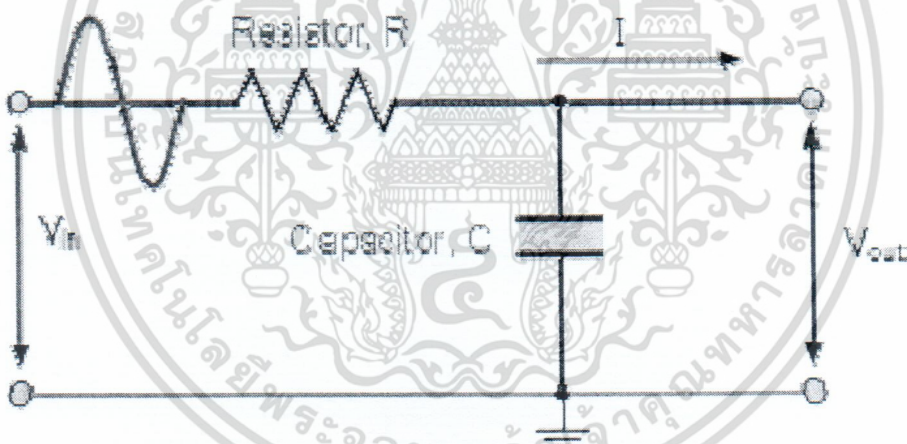
1) แบบ Passive คือวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อใหทำงาน ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และ ขดลวดเหนี่ยวนำ (L)

2) แบบ Active คือ วงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นการทำงานของตัวอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ทรานซิสเตอร์ หรือ ไอซี

### 4.2.1 ประเภทของวงจรกรองความถี่

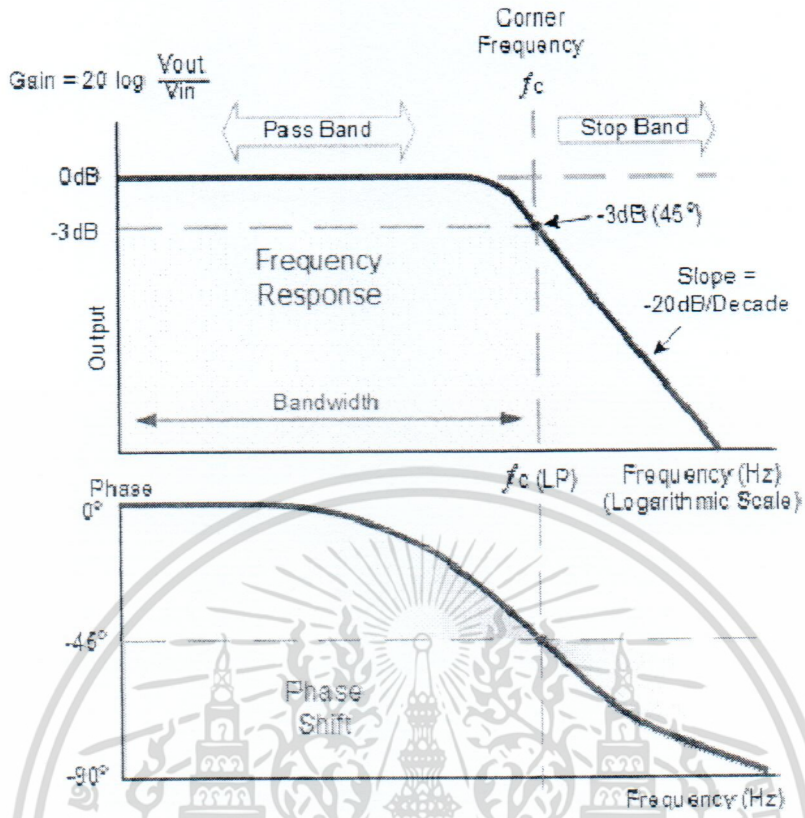
#### 4.2.1.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF)

หมายถึง วงจรที่จะยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ที่กำหนดสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จะลดทอนไปตามลำดับ ลักษณะของวงจรมีตั้งแต่อันดับหนึ่งขึ้นไป ดังภาพที่ 4.38 4.39 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ [20]

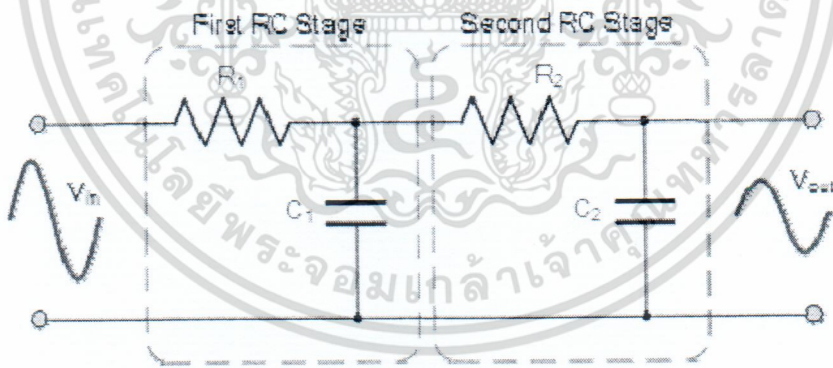


ภาพที่ 4.38 วงจร LPF อันดับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

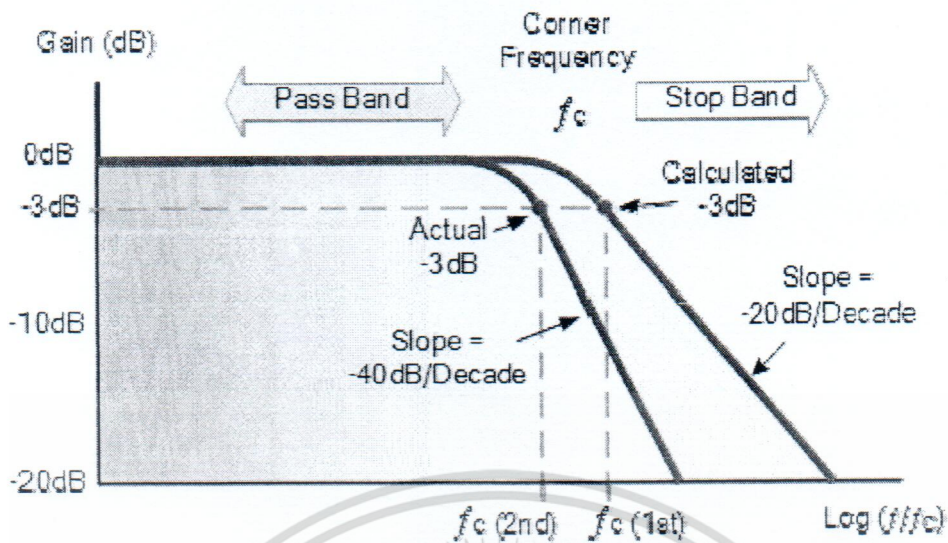


ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร LPF อันดับ 1



ภาพที่ 4.40 วงจร LPF อันดับ 2 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร LPF อันดับ 2

จากรูปวงจรเมื่อทำการป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร ที่ C จะมีค่า XC สูง ทำให้ความถี่ต่ำไหลผ่าน R ที่มีค่าความต้านทานน้อยกว่า XC ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า XC จะลดลง ทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้อีกจะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก

ในทางทฤษฎีวงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้สัญญาณใดๆ ที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดซึ่งเรียกว่า ความถี่คัทออฟ หรือ ความถี่ขอบเขต (Cutoff Frequency) ผ่านไปได้โดยไม่มีกรลดทอนของสัญญาณ และถ้าความถี่ของสัญญาณเข้ามีค่าเกินที่กำหนดไว้ สัญญาณออกควรจะมีความเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถจะทำเช่นนั้นได้ เนื่องจากการตอบสนองของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ของอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ จะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ดังนั้นผลที่ได้จึงเป็นดังรูปที่ 1 คือเมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นวงจรจะลดสัญญาณลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจะลดลงในอัตราคงที่ค่าหนึ่ง

ขั้นตอนการคำนวณวงจรกรองความถี่ต่ำ

สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านก็คือ ค่าความถี่คัทออฟ  $\omega_c$  ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งความถี่คัทออฟหาได้จากสมการ

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (4.2)$$

โดยที่	$\omega_c$	มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (rad/s)
	$f_c$	มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
	R	มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )
	C	มีหน่วยเป็น ฟาร์ด (F)

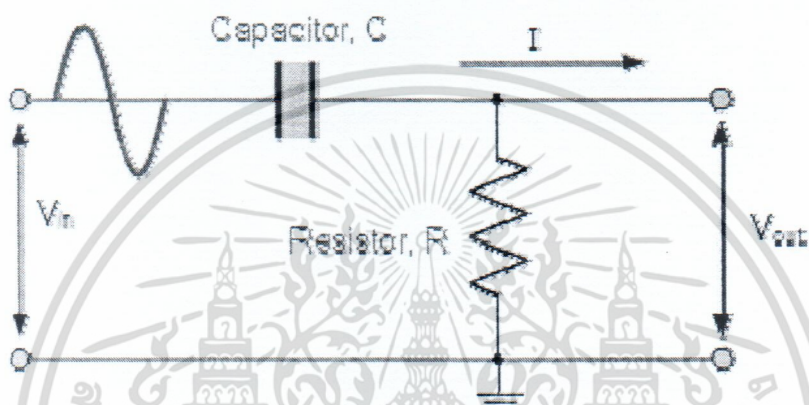
ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนด  $\omega_c$  ไว้แล้ว ต้องการจะหาค่า R ก็จะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{1}{\omega_c C} = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (4.3)$$

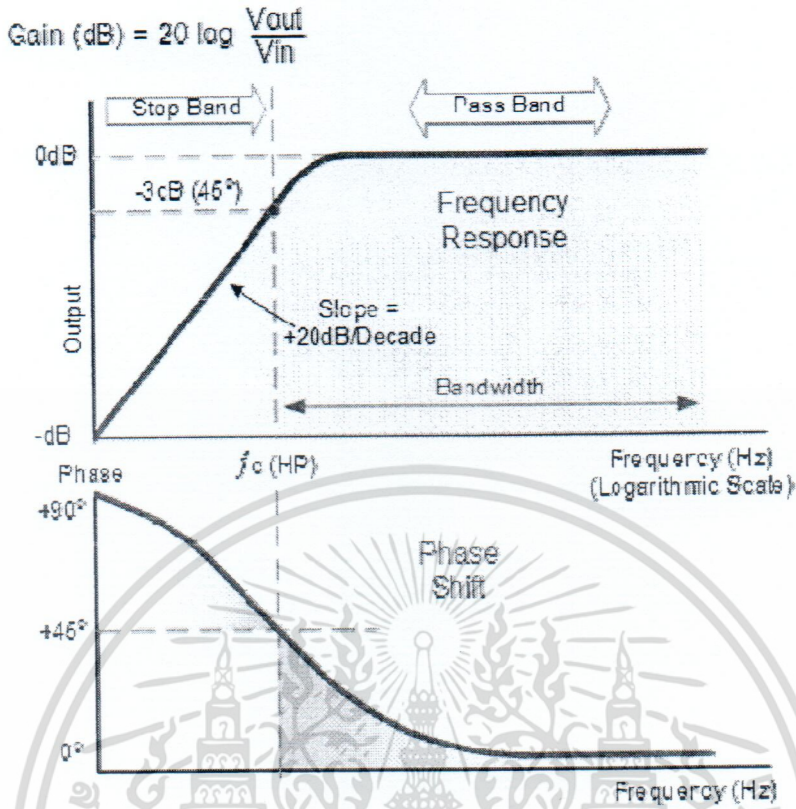
#### 4.2.1.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter: HPF)

มีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ คือการตอบสนองต่อสัญญาณของวงจรจะยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านและลดทอนสัญญาณความถี่ต่ำ ซึ่งแสดงวงจรและกราฟตอบสนองอัตรายายแรงดันความถี่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.42 และ 4.43 [7] ตามลำดับ



ภาพที่ 4.42 ตัวอย่างวงจร HPF อันดับ 1

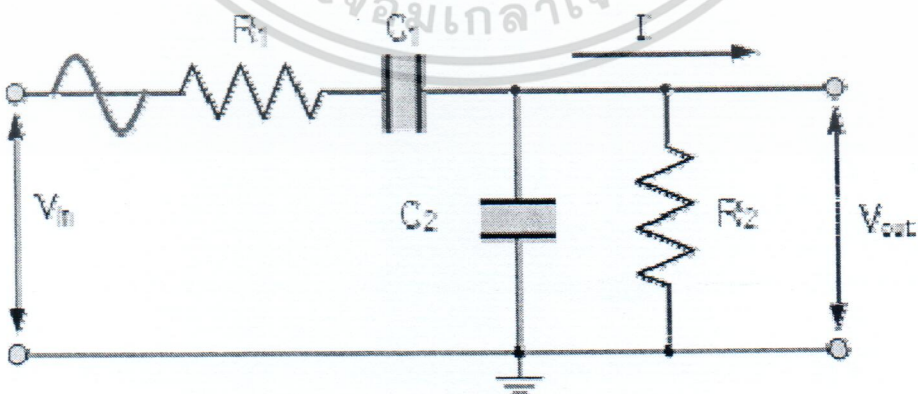
จากภาพจะเห็นว่า C ต่อกับวงจร ส่วน R ต่อขานกับวงจร เมื่อป้อนความถี่ต่ำกว่าเข้ามา C จะมีค่า  $X_C$  สูง ทำให้สัญญาณผ่านไปได้น้อย ทำให้สัญญาณที่ผ่านมาจาก C ลงกราวด์ได้หมด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น C จะมีค่า  $X_C$  ลดลง สัญญาณจะผ่านได้มากขึ้น สัญญาณก็จะลงกราวด์น้อยลงเพราะมี R กันไว้ สัญญาณที่ออกไปยัง Output จะมีมากขึ้น จนถึงระดับความแรงของสัญญาณประมาณ 70.7 % ของความแรงสูงสุด ระดับนี้เองที่เราเรียกว่า ช่วงความถี่ Cut off เมื่อความถี่สูงกว่า ความถี่ นี้ C จะยอมให้สัญญาณผ่านได้สะดวกและค่า R จะต้านสัญญาณไม่ให้ลงกราวด์ ความถี่จึงผ่านไปที่จุด Output ได้ทั้งหมด ขั้นตอนการคำนวณวงจรกรองความถี่สูง จะมีหลักการคำนวณเช่นเดียวกับวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ



ภาพที่ 4.43 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร HPF อันดับ 1

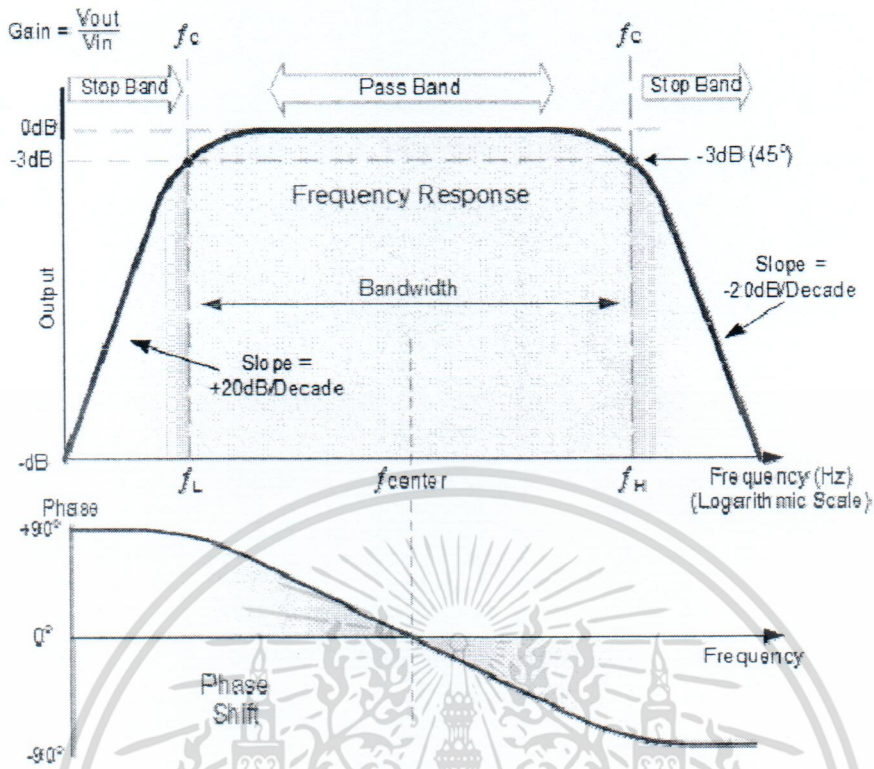
4.2.1.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF)

เนื่องจากเป็นวงจรที่มีลักษณะคล้ายกับการนำเอาวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูง มาต่อร่วมกัน (Cascade) ดังนั้น วงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง จะยอมให้สัญญาณผ่านไปได้เฉพาะช่วงที่กำหนดเท่านั้น ความถี่ที่นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกจำกัดโดยการลดทอนให้หมดไป



ภาพที่ 4.44 ตัวอย่างวงจร BPF

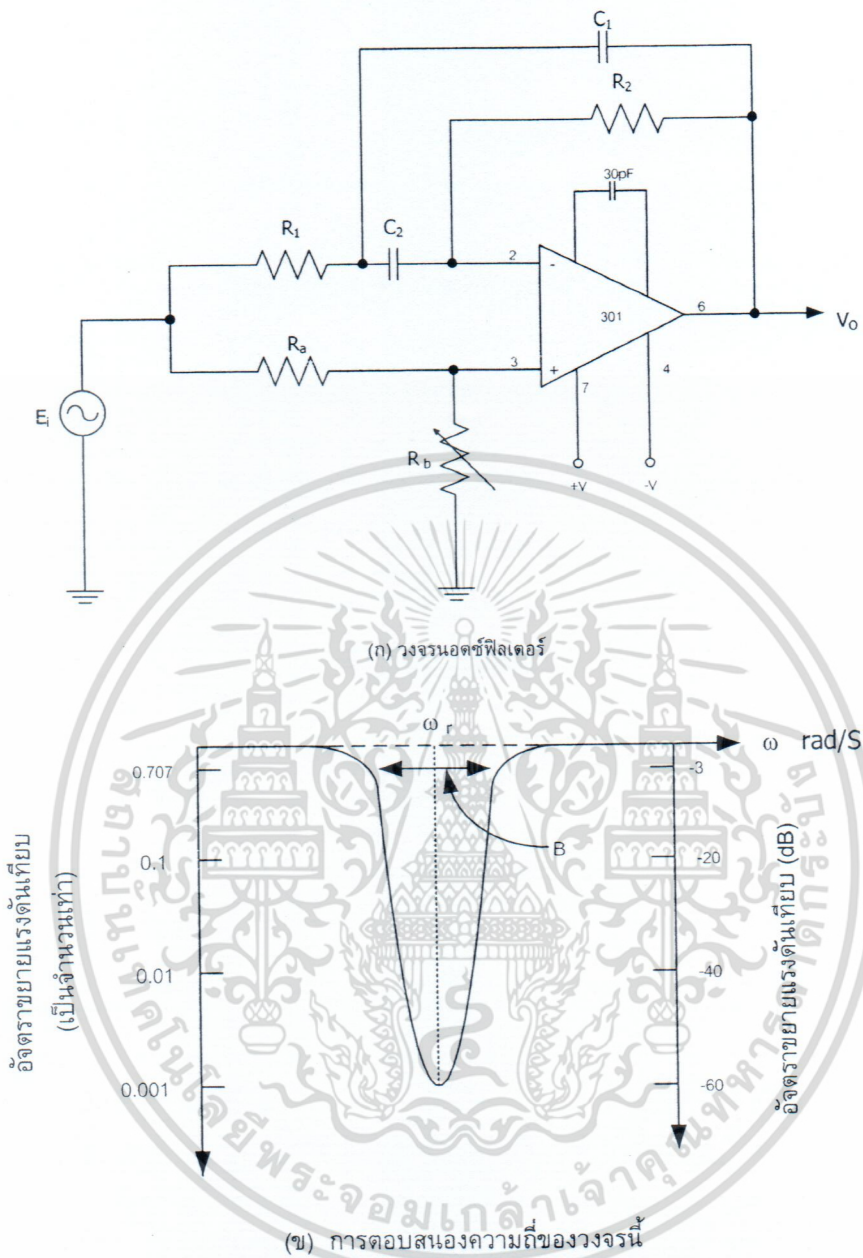
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.45 กราฟแสดงเฟสและอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ของวงจร BPF

#### 4.2.1.4 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter: BRF)

วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่หรือวงจรกรองความถี่ออกเฉพาะช่วง (band - elimination filter) เป็นวงจรที่กำจัดความถี่บางช่วงออกไป บางครั้งเราเรียกว่า นอตช์ฟิลเตอร์ (notch filter) ตัวอย่างของวงจรแสดงได้ในภาพที่ 4.46 (ก) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองทางความถี่ดังในภาพที่ 4.46 (ข) จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีความถี่ช่วงผ่านอยู่สองช่วงทั้งซ้ายและขวา และมีความถี่ที่อยู่ตรงกลางถูกกำจัดหายไปความถี่นี้เราจะเรียกว่า ความถี่เรโซแนนต์ ( $\omega_r$ ) เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเฉพาะช่วงตัวอย่างของวงจรประเภทนี้ได้แก่ การกำจัดความถี่ 50 Hz หรือ 400 Hz ในการใช้งานมอเตอร์เจเนอเรเตอร์ เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เป็นต้น การคำนวณและออกแบบวงจรก็เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงคือ ต้องนำเอาช่วงกว้างความถี่ B และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ Q มาคิดร่วมกับ  $\omega_r$  ด้วย



ภาพที่ 4.46 วงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงและการตอบสนองความถี่

### 4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่สำหรับระบบ DVB

สำหรับโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบ Band Pass Filter สำหรับนำไปใช้งานกับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล บนย่านความถี่ UHF ช่วงความถี่ระหว่าง 470-860 MHz โดยออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ในส่วนที่ทำหน้าที่หลังจากผ่านวงจรรขยายกำลังทางด้านภาคส่ง ช่วงความถี่ 470-478 MHz (ช่อง 21) [22]

โดยทั่วไปการคำนวณการออกแบบวงจรกรองความถี่มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธี Chebyshev วิธี Butterworth และวิธี Bessel เป็นต้น สำหรับโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธี Chebyshev ในการคำนวณ และใช้โปรแกรม Microwave Office [21] จำลองผลการทำงานของวงจรกรองความถี่ที่ได้

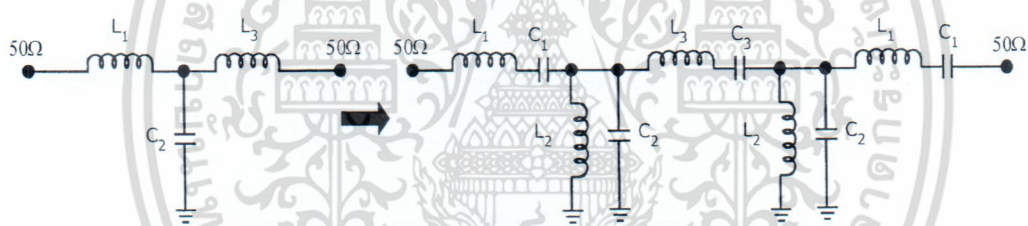
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบขึ้นมา เนื่องด้วยเหตุผลที่ว่าวิธี Chebyshev สามารถที่จะกำหนดค่า Ripple หรือการแกว่งของแอมพลิจูดได้ คณะผู้วิจัยจึงได้นำวิธีการนี้มาคำนวณโดยเลือกใช้ค่า ripple 0.1 dB เพื่อให้ขอบสันของสัญญาณราบเรียบมากที่สุด

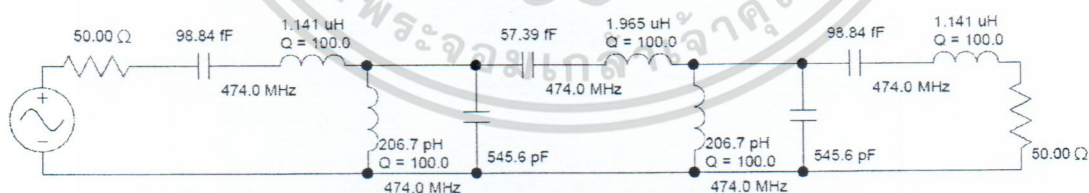
จากนั้นทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยโปรแกรม Microwave office และจำลองการทำงาน (ในส่วนี้ โปรแกรมดังกล่าวจะมีตัวอย่างวงจรกรองความถี่ประเภทต่าง ๆ ให้เลือกอยู่แล้ว เพียงแต่กำหนดค่าพารามิเตอร์ช่วงความถี่ และเงื่อนไขการออกแบบวงจรลงไป) ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนี้ถือว่าเป็นกรณีที่ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นในวงจรกรองความถี่ หลังจากที่เราจำลองผลการทำงานโปรแกรมจะทำการออกแบบและกำหนดค่าอุปกรณ์ให้โดยอัตโนมัติ วงจรกรองกรองความถี่แบบ Band Pass Filter ที่เราทำการออกแบบจะใช้ order 5 เพราะว่าเมื่อทำการจำลองผลที่ order สูง ๆ ขึ้นไปเรื่อย ๆ แม้ว่าสัญญาณจะมีการแกว่งน้อยก็ตามแต่มีผลทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณมากตามไปด้วย จากนั้นผลที่ได้จากการออกแบบจะถูกนำไปสร้างสร้างวงจรจริง ดังจะอธิบายเป็นหัวข้อต่อไป

#### 4.3.1 การออกแบบวงจรกรองย่านความถี่ผ่านช่วง 470-478 MHz

- 1) กำหนดความถี่ที่ใช้งาน (ความถี่กลาง) ในที่นี้ ความถี่  $f_c = 474$  MHz
- 2) ในที่นี้กำหนดให้  $R_s$  (Source Impedance) และ  $R_L$  (Load Impedance) เท่ากับ  $50 \Omega$  ดังนั้น  $R_s/R_L = 1$
- 3) กำหนดให้ Ripple = 0.1 dB,  $n = 5$  และ  $BW_{3dB} = 8$  MHz

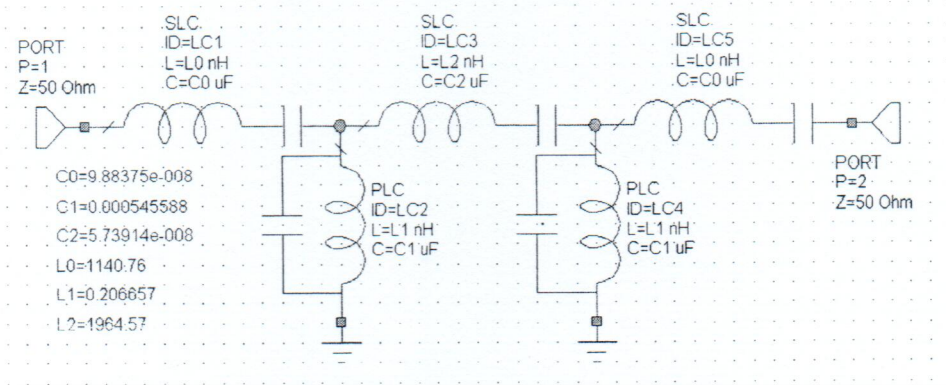


ภาพที่ 4.47 ตัวอย่างวงจรสมมูลของ Band Pass filter

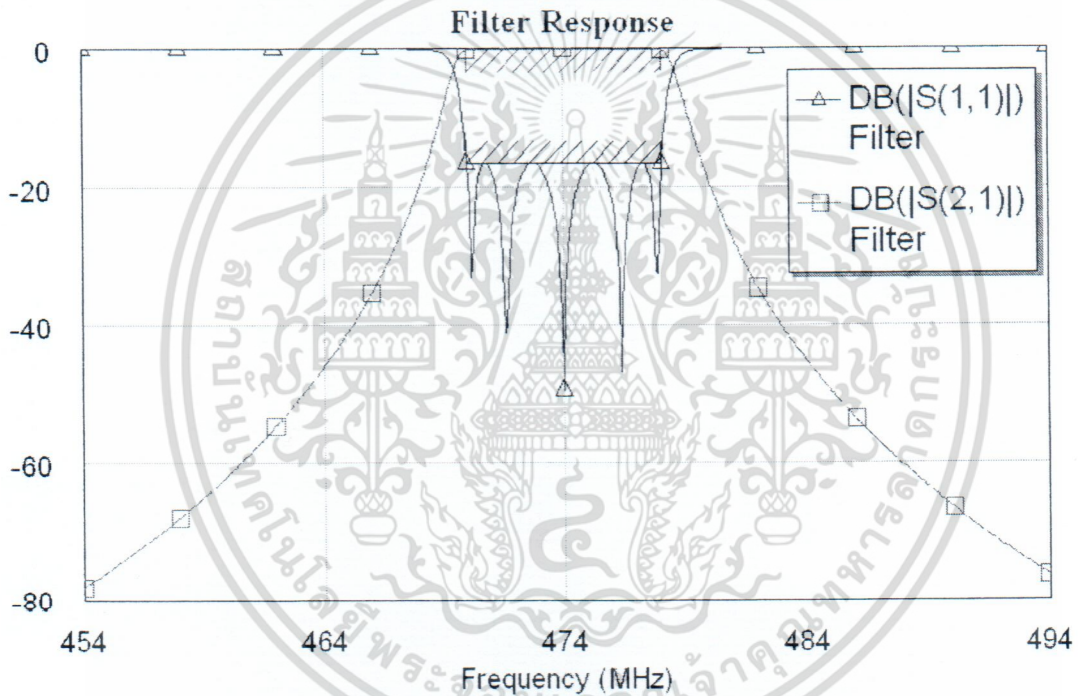


ภาพที่ 4.48 การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่าน แบบ Chebyshev Order 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.49 การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านโดยโปรแกรม Microwave office

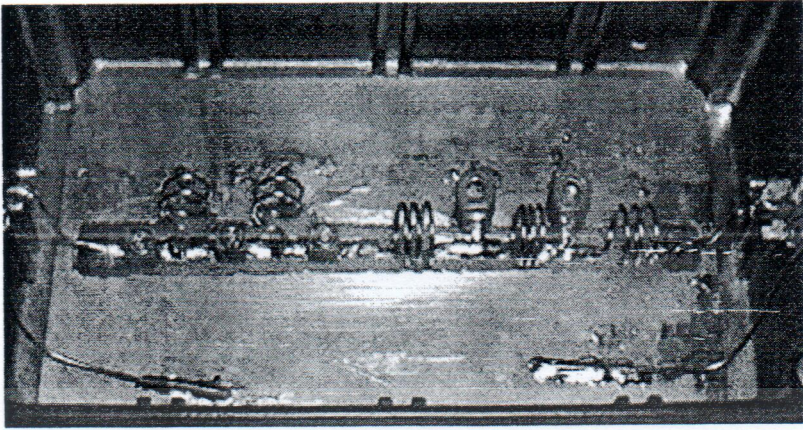


ภาพที่ 4.50 ผลการจำลองผลตอบสนองความถี่ผ่านของ แบบ Chebyshev Order 5

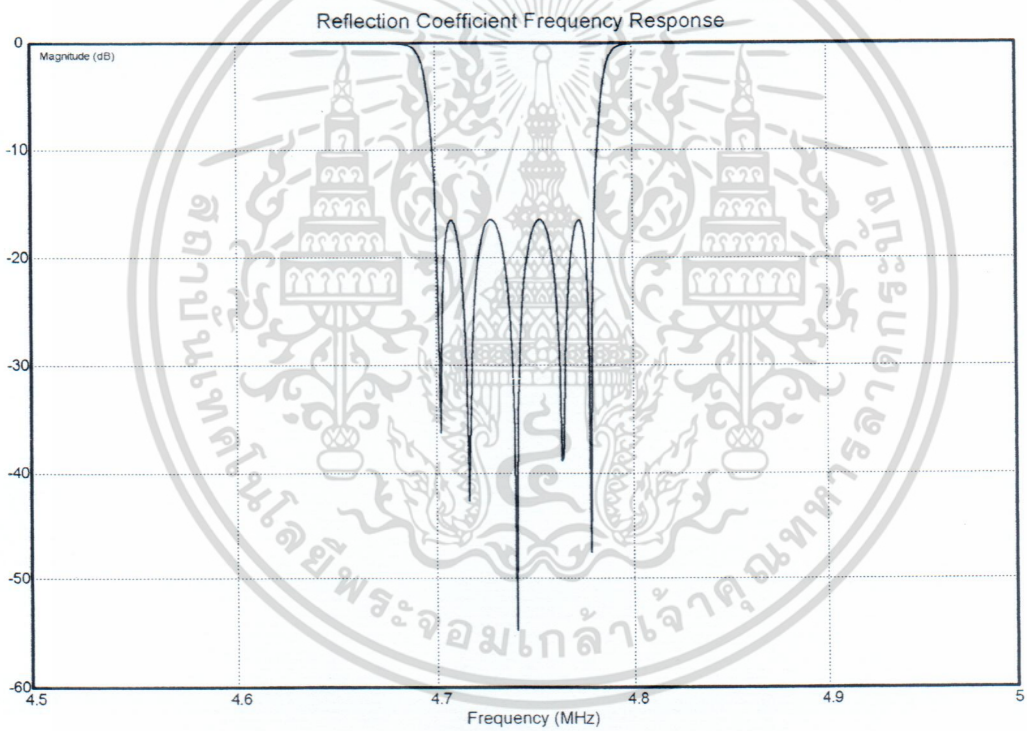
4.3.2 ผลการทดลองของวงจรกรองย่านความถี่ผ่านช่วง 470-478 MHz

ผลการทดลองจากการออกแบบของวงจรกรองความถี่ Band Pass Filter แบบ Chebyshev ชนิดพาสที่พี order 5 ที่ความถี่  $f_c = 474$  MHz และมีแบนด์วิดท์ 8 MHz แสดงดังภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

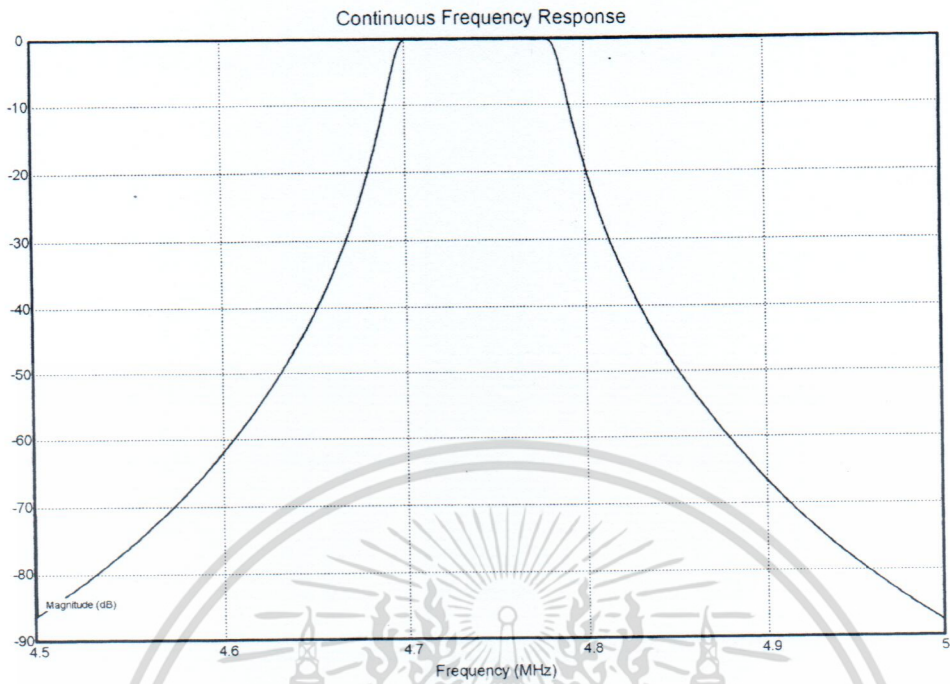


ภาพที่ 4.51 วงจรกรองความถี่ผ่าน แบบ Chebyshev Order 5 ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

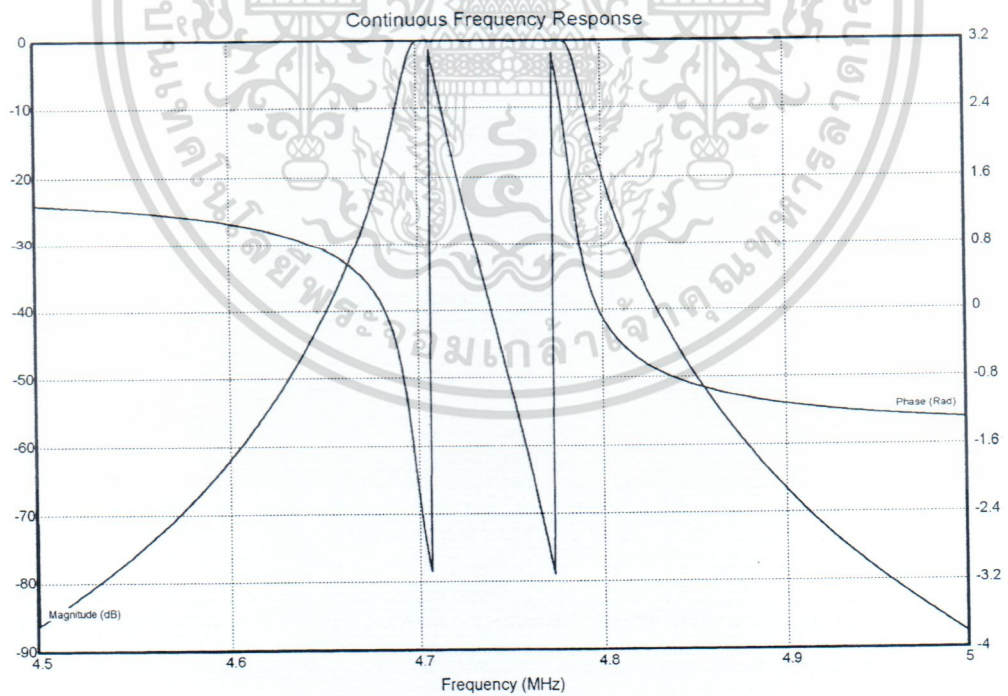


ภาพที่ 4.52 ค่า Return Loss ของวงจรกรองความถี่ผ่านที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.53 ค่า Magnitude ของวงจรรองความถี่ผ่านที่ได้จากการวัด



ภาพที่ 4.54 ค่า Phase ของวงจรรองความถี่ผ่านที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ผ่านแบบ Chebyshev Order 5 ระหว่างช่วงความถี่ 470-478 MHz และมีแบนด์วิดท์ 8 MHz วงจรกรองความถี่ที่ได้สร้างขึ้นจะถูกต่อเข้าในระบบหลังจากผ่านวงจรขยายกำลังมาแล้วทางด้านภาคส่ง และนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล (DVB-T) ซึ่งคุณสมบัติวงจรกรองความถี่ที่สร้างขึ้นมีค่า Return Loss ที่ต่ำคือ -33.6 dB (วัด ณ ความถี่กลาง  $f_c = 474$  MHz) โดยแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก

ผลที่ได้จากการศึกษา ค้นคว้าวิจัย เพื่อทำการออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ ตลอดทั้งโครงการวิจัยนี้ ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากมายมหาศาล ยกตัวอย่างเช่น

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับระบบการแพร่ภาพโทรทัศน์ดิจิทัล ที่กำลังได้รับความนิยมและเป็นเทคโนโลยีที่มีอิทธิพลต่อระบบการสื่อสารของประเทศไทยในปัจจุบัน
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องส่งและเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัล
3. มีความรู้ความเข้าใจทางด้านวงจร RF ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน
4. สามารถออกแบบ เข้าใจหลักการของวงจรกรองความถี่ และนำความรู้ที่ได้จากทฤษฎีมาใช้ในการปฏิบัติจริง

#### ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับวงจรกรองความถี่ที่เราได้ออกแบบเสร็จและทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมเสร็จแล้วนั้น เมื่อนำมาสร้างวงจรจริงการปรับแต่งค่าตัวเหนี่ยวนำจะต้องระมัดระวังมากเป็นพิเศษ เพราะย่าน UHF เป็นย่านความถี่สูง ฉะนั้นหากค่าตัวเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ความถี่เปลี่ยนไปมาก
2. ไม่มีเครื่องที่วัดค่าตัวเหนี่ยวนำที่แน่นอน ดังนั้นในการสร้างวงจรจริงจึงได้จากการประมาณเท่านั้น
3. การทำงานเกี่ยวกับระบบ RF นั้นต้องใช้เวลานาน เพื่อวิเคราะห์และทำการแก้ไขจนกว่าจะได้วงจรที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300700\\_300799/300744/01.05.01\\_40/en\\_300744v010501o.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.05.01_40/en_300744v010501o.pdf)
- [2] [http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Television\\_Broadcasting/index.php](http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Television_Broadcasting/index.php)
- [3] USA, "Federal Communications Commission," category, 28 April 2008, 30 April 2008.  
<http://www.fcc.gov>
- [4] Todorovic, Aleksandra Louis, Television technology demystified, Burlington: Elsevier, 2006.
- [5] Bray, John, Innovation and the communications revolution, London: The Institution of Electrical Engineers, 2002.
- [6] Grob, Bernard, Basic television and video system, 5th ed. Singapore: McGraw-Hill, 1984.
- [7] ประเทศไทย, "ศูนย์เทคโนโลยีทางการศึกษา," ดิจิทัล, 25 เมษายน 2550 <http://www.ceted.org>
- [8] กรัลลา, เพรสตัน, เทคโนโลยีไร้สายทำงานอย่างไร, แปลโดย สุขสันต์ เรือนแก้ว, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2548.
- [9] ปรัชญนันท์ นิลสุข, ทฤษฎีและการทำงานของเครื่องรับโทรทัศน์เบื้องต้น, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541.
- [10] <http://th.wikipedia.org/wiki/โทรทัศน์ระบบดิจิทัล>
- [11] <http://dvbt.blogspot.com/2011/01/dvb-t.html>
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/DVB-T>
- [13] [http://dtv.mcot.net/techno\\_one.php?dateone=1243415842](http://dtv.mcot.net/techno_one.php?dateone=1243415842)
- [14] <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/22/resistor1/resistor1.html>
- [15] [http://www.rapidtables.com/electric/Resistor\\_Symbols.htm](http://www.rapidtables.com/electric/Resistor_Symbols.htm)
- [16] [http://www.mwit.ac.th/~ponchai/webCapacitor/WBTPI\\_Model/Capacitor/capacitor1.html](http://www.mwit.ac.th/~ponchai/webCapacitor/WBTPI_Model/Capacitor/capacitor1.html)
- [17] <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-04.html>
- [18] [http://202.143.156.146/~bse/4\\_2electronic\\_device/4\\_2\\_4transistor.html](http://202.143.156.146/~bse/4_2electronic_device/4_2_4transistor.html)
- [19] [http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data\\_com/datacom\\_52/Filter.htm](http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/Filter.htm)
- [20] [http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter\\_2.html](http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html)
- [21] <http://www.awrcorp.com/products/microwave-office>
- [22] <http://www.nics-sat.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=391278&Ntype=5>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ผลการทดลองการตอบสนองความถี่ของ BPF (470-478 MHz)

Reflection Coefficient	Frequency Response
4.5457e+08	-8.9959e-08
4.5466e+08	-9.4714e-08
4.5476e+08	-9.9743e-08
4.5485e+08	-1.0507e-07
4.5495e+08	-1.1072e-07
4.5504e+08	-1.1669e-07
4.5514e+08	-1.2303e-07
4.5524e+08	-1.2975e-07
4.5533e+08	-1.3688e-07
4.5543e+08	-1.4444e-07
4.5552e+08	-1.5246e-07
4.5562e+08	-1.6097e-07
4.5571e+08	-1.7002e-07
4.5581e+08	-1.7962e-07
4.5591e+08	-1.8983e-07
4.56e+08	-2.0068e-07
4.561e+08	-2.1222e-07
4.5619e+08	-2.2449e-07
4.5629e+08	-2.3755e-07
4.5639e+08	-2.5146e-07
4.5648e+08	-2.6626e-07
4.5658e+08	-2.8204e-07
4.5667e+08	-2.9885e-07
4.5677e+08	-3.1677e-07
4.5687e+08	-3.3589e-07
4.5696e+08	-3.5628e-07
4.5706e+08	-3.7805e-07
4.5715e+08	-4.0129e-07
4.5725e+08	-4.2612e-07
4.5735e+08	-4.5265e-07
4.5744e+08	-4.8102e-07
4.5754e+08	-5.1136e-07
4.5763e+08	-5.4383e-07
4.5773e+08	-5.7858e-07
4.5783e+08	-6.158e-07
4.5792e+08	-6.5568e-07
4.5802e+08	-6.9843e-07
4.5812e+08	-7.4426e-07
4.5821e+08	-7.9345e-07
4.5831e+08	-8.4623e-07
4.5841e+08	-9.0292e-07
4.585e+08	-9.6384e-07
4.586e+08	-1.0293e-06
4.5869e+08	-1.0997e-06
4.5879e+08	-1.1755e-06
4.5889e+08	-1.2571e-06
4.5898e+08	-1.3449e-06
4.5908e+08	-1.4396e-06
4.5918e+08	-1.5417e-06
4.5927e+08	-1.6519e-06
4.5937e+08	-1.7708e-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันการช่างเพื่อการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5457e+08	-8.9959e-08	4.5947e+08	-1.8992e-06	4.6442e+08	-0.00017083
4.5466e+08	-9.4714e-08	4.5956e+08	-2.038e-06	4.6452e+08	-0.00019147
4.5476e+08	-9.9743e-08	4.5966e+08	-2.188e-06	4.6462e+08	-0.00021493
4.5485e+08	-1.0507e-07	4.5976e+08	-2.3504e-06	4.6471e+08	-0.00024161
4.5495e+08	-1.1072e-07	4.5985e+08	-2.5261e-06	4.6481e+08	-0.00027203
4.5504e+08	-1.1669e-07	4.5995e+08	-2.7165e-06	4.6491e+08	-0.00030676
4.5514e+08	-1.2303e-07	4.6005e+08	-2.9228e-06	4.6501e+08	-0.00034648
4.5524e+08	-1.2975e-07	4.6014e+08	-3.1466e-06	4.6511e+08	-0.00039201
4.5533e+08	-1.3688e-07	4.6024e+08	-3.3895e-06	4.652e+08	-0.00044428
4.5543e+08	-1.4444e-07	4.6034e+08	-3.6532e-06	4.653e+08	-0.00050442
4.5552e+08	-1.5246e-07	4.6043e+08	-3.9397e-06	4.654e+08	-0.00057376
4.5562e+08	-1.6097e-07	4.6053e+08	-4.2513e-06	4.655e+08	-0.00065386
4.5571e+08	-1.7002e-07	4.6063e+08	-4.5904e-06	4.656e+08	-0.00074661
4.5581e+08	-1.7962e-07	4.6072e+08	-4.9595e-06	4.6569e+08	-0.00085425
4.5591e+08	-1.8983e-07	4.6082e+08	-5.3617e-06	4.6579e+08	-0.00097945
4.56e+08	-2.0068e-07	4.6092e+08	-5.8002e-06	4.6589e+08	-0.0011254
4.561e+08	-2.1222e-07	4.6102e+08	-6.2788e-06	4.6599e+08	-0.0012961
4.5619e+08	-2.2449e-07	4.6111e+08	-6.8013e-06	4.6608e+08	-0.0014961
4.5629e+08	-2.3755e-07	4.6121e+08	-7.3723e-06	4.6618e+08	-0.0017312
4.5639e+08	-2.5146e-07	4.6131e+08	-7.9967e-06	4.6628e+08	-0.0020082
4.5648e+08	-2.6626e-07	4.614e+08	-8.6801e-06	4.6638e+08	-0.0023357
4.5658e+08	-2.8204e-07	4.615e+08	-9.4287e-06	4.6648e+08	-0.0027239
4.5667e+08	-2.9885e-07	4.616e+08	-1.0249e-05	4.6658e+08	-0.0031857
4.5677e+08	-3.1677e-07	4.6169e+08	-1.1149e-05	4.6667e+08	-0.0037368
4.5687e+08	-3.3589e-07	4.6179e+08	-1.2138e-05	4.6677e+08	-0.0043968
4.5696e+08	-3.5628e-07	4.6189e+08	-1.3224e-05	4.6687e+08	-0.00519
4.5706e+08	-3.7805e-07	4.6199e+08	-1.4419e-05	4.6697e+08	-0.0061469
4.5715e+08	-4.0129e-07	4.6208e+08	-1.5734e-05	4.6707e+08	-0.0073059
4.5725e+08	-4.2612e-07	4.6218e+08	-1.7183e-05	4.6716e+08	-0.0087158
4.5735e+08	-4.5265e-07	4.6228e+08	-1.8781e-05	4.6726e+08	-0.010438
4.5744e+08	-4.8102e-07	4.6238e+08	-2.0546e-05	4.6736e+08	-0.012552
4.5754e+08	-5.1136e-07	4.6247e+08	-2.2495e-05	4.6746e+08	-0.015159
4.5763e+08	-5.4383e-07	4.6257e+08	-2.4652e-05	4.6756e+08	-0.018391
4.5773e+08	-5.7858e-07	4.6267e+08	-2.7039e-05	4.6766e+08	-0.022419
4.5783e+08	-6.158e-07	4.6276e+08	-2.9685e-05	4.6775e+08	-0.027469
4.5792e+08	-6.5568e-07	4.6286e+08	-3.262e-05	4.6785e+08	-0.033837
4.5802e+08	-6.9843e-07	4.6296e+08	-3.588e-05	4.6795e+08	-0.041921
4.5812e+08	-7.4426e-07	4.6306e+08	-3.9505e-05	4.6805e+08	-0.052253
4.5821e+08	-7.9345e-07	4.6315e+08	-4.354e-05	4.6815e+08	-0.065553
4.5831e+08	-8.4623e-07	4.6325e+08	-4.8036e-05	4.6825e+08	-0.082806
4.5841e+08	-9.0292e-07	4.6335e+08	-5.3051e-05	4.6834e+08	-0.10537
4.585e+08	-9.6384e-07	4.6345e+08	-5.8654e-05	4.6844e+08	-0.13514
4.586e+08	-1.0293e-06	4.6354e+08	-6.4919e-05	4.6854e+08	-0.17476
4.5869e+08	-1.0997e-06	4.6364e+08	-7.1934e-05	4.6864e+08	-0.228
4.5879e+08	-1.1755e-06	4.6374e+08	-7.98e-05	4.6874e+08	-0.30024
4.5889e+08	-1.2571e-06	4.6384e+08	-8.863e-05	4.6884e+08	-0.39922
4.5898e+08	-1.3449e-06	4.6393e+08	-9.8556e-05	4.6894e+08	-0.53615
4.5908e+08	-1.4396e-06	4.6403e+08	-0.00010973	4.6903e+08	-0.72724
4.5918e+08	-1.5417e-06	4.6413e+08	-0.00012233	4.6913e+08	-0.99583
4.5927e+08	-1.6519e-06	4.6423e+08	-0.00013655	4.6923e+08	-1.375
4.5937e+08	-1.7708e-06	4.6432e+08	-0.00015262	4.6933e+08	-1.9104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6943e+08	-2.6624	4.7449e+08	-20.881	4.7961e+08	-0.12879
4.6953e+08	-3.7057	4.7459e+08	-19.59	4.7971e+08	-0.10057
4.6963e+08	-5.1284	4.7469e+08	-18.588	4.7981e+08	-0.07915
4.6973e+08	-7.0316	4.7479e+08	-17.814	4.7991e+08	-0.062743
4.6982e+08	-9.5478	4.7489e+08	-17.23	4.8001e+08	-0.050076
4.6992e+08	-12.908	4.7499e+08	-16.814	4.8011e+08	-0.040223
4.7002e+08	-17.676	4.7509e+08	-16.551	4.8021e+08	-0.032503
4.7012e+08	-26.057	4.7519e+08	-16.435	4.8031e+08	-0.026413
4.7022e+08	-36.204	4.7529e+08	-16.463	4.8042e+08	-0.021579
4.7032e+08	-23.63	4.7539e+08	-16.642	4.8052e+08	-0.017718
4.7042e+08	-19.76	4.7549e+08	-16.983	4.8062e+08	-0.014618
4.7052e+08	-17.849	4.7559e+08	-17.506	4.8072e+08	-0.012114
4.7062e+08	-16.869	4.7569e+08	-18.242	4.8082e+08	-0.010082
4.7071e+08	-16.466	4.7579e+08	-19.244	4.8092e+08	-0.0084246
4.7081e+08	-16.486	4.7589e+08	-20.594	4.8102e+08	-0.0070669
4.7091e+08	-16.862	4.7599e+08	-22.441	4.8112e+08	-0.0059499
4.7101e+08	-17.577	4.7609e+08	-25.089	4.8122e+08	-0.0050269
4.7111e+08	-18.652	4.7619e+08	-29.321	4.8133e+08	-0.0042613
4.7121e+08	-20.157	4.7629e+08	-38.8	4.8143e+08	-0.0036239
4.7131e+08	-22.241	4.7639e+08	-38.412	4.8153e+08	-0.0030912
4.7141e+08	-25.242	4.7649e+08	-28.939	4.8163e+08	-0.0026446
4.7151e+08	-30.114	4.7659e+08	-24.57	4.8173e+08	-0.0022688
4.7161e+08	-42.515	4.7669e+08	-21.787	4.8183e+08	-0.0019517
4.7171e+08	-35.976	4.7679e+08	-19.831	4.8193e+08	-0.0016833
4.718e+08	-28.313	4.7689e+08	-18.417	4.8203e+08	-0.0014554
4.719e+08	-24.497	4.7699e+08	-17.414	4.8214e+08	-0.0012614
4.72e+08	-22.039	4.7709e+08	-16.764	4.8224e+08	-0.0010958
4.721e+08	-20.303	4.7719e+08	-16.453	4.8234e+08	-0.00095405
4.722e+08	-19.029	4.7729e+08	-16.507	4.8244e+08	-0.00083243
4.723e+08	-18.083	4.7739e+08	-17.005	4.8254e+08	-0.00072783
4.724e+08	-17.391	4.7749e+08	-18.125	4.8264e+08	-0.00063765
4.725e+08	-16.905	4.7759e+08	-20.291	4.8274e+08	-0.00055974
4.726e+08	-16.596	4.777e+08	-24.834	4.8285e+08	-0.00049227
4.727e+08	-16.446	4.778e+08	-47.52	4.8295e+08	-0.00043373
4.728e+08	-16.446	4.779e+08	-23.873	4.8305e+08	-0.00038283
4.729e+08	-16.59	4.78e+08	-16.603	4.8315e+08	-0.00033848
4.73e+08	-16.881	4.781e+08	-12.183	4.8325e+08	-0.00029976
4.731e+08	-17.328	4.782e+08	-9.0117	4.8335e+08	-0.00026591
4.732e+08	-17.946	4.783e+08	-6.6257	4.8346e+08	-0.00023624
4.733e+08	-18.76	4.784e+08	-4.823	4.8356e+08	-0.00021021
4.7339e+08	-19.812	4.785e+08	-3.4801	4.8366e+08	-0.00018733
4.7349e+08	-21.167	4.786e+08	-2.4988	4.8376e+08	-0.00016717
4.7359e+08	-22.941	4.787e+08	-1.7935	4.8386e+08	-0.0001494
4.7369e+08	-25.352	4.788e+08	-1.2921	4.8396e+08	-0.00013369
4.7379e+08	-28.906	4.789e+08	-0.93718	4.8407e+08	-0.0001198
4.7389e+08	-35.308	4.79e+08	-0.68561	4.8417e+08	-0.00010749
4.7399e+08	-54.821	4.791e+08	-0.50641	4.8427e+08	-9.6569e-05
4.7409e+08	-33.653	4.792e+08	-0.37779	4.8437e+08	-8.6863e-05
4.7419e+08	-28.094	4.7931e+08	-0.28466	4.8447e+08	-7.8227e-05
4.7429e+08	-24.826	4.7941e+08	-0.21656	4.8458e+08	-7.0532e-05
4.7439e+08	-22.562	4.7951e+08	-0.16628	4.8468e+08	-6.3668e-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8478e+08	-5.7535e-05	4.9001e+08	-9.5185e-07	4.9529e+08	-5.402e-08
4.8488e+08	-5.205e-05	4.9011e+08	-8.9177e-07	4.9539e+08	-5.1456e-08
4.8498e+08	-4.7139e-05	4.9021e+08	-8.3585e-07	4.955e+08	-4.9023e-08
4.8509e+08	-4.2735e-05	4.9032e+08	-7.8377e-07	4.956e+08	-4.6718e-08
4.8519e+08	-3.8783e-05	4.9042e+08	-7.3525e-07	4.9571e+08	-4.4532e-08
4.8529e+08	-3.5231e-05	4.9052e+08	-6.9001e-07	4.9581e+08	-4.2457e-08
4.8539e+08	-3.2036e-05	4.9063e+08	-6.4784e-07	4.9592e+08	-4.049e-08
4.8549e+08	-2.9158e-05	4.9073e+08	-6.0849e-07	4.9602e+08	-3.8621e-08
4.856e+08	-2.6564e-05	4.9083e+08	-5.7175e-07	4.9612e+08	-3.6849e-08
4.857e+08	-2.4223e-05	4.9094e+08	-5.3745e-07	4.9623e+08	-3.5164e-08
4.858e+08	-2.2108e-05	4.9104e+08	-5.054e-07	4.9633e+08	-3.3562e-08
4.859e+08	-2.0195e-05	4.9114e+08	-4.7545e-07	4.9644e+08	-3.2043e-08
4.86e+08	-1.8464e-05	4.9124e+08	-4.4744e-07	4.9654e+08	-3.0597e-08
4.8611e+08	-1.6895e-05	4.9135e+08	-4.2124e-07	4.9665e+08	-2.9226e-08
4.8621e+08	-1.5473e-05	4.9145e+08	-3.9673e-07	4.9675e+08	-2.7919e-08
4.8631e+08	-1.4182e-05	4.9155e+08	-3.7377e-07	4.9686e+08	-2.6677e-08
4.8641e+08	-1.3009e-05	4.9166e+08	-3.5228e-07	4.9696e+08	-2.5497e-08
4.8652e+08	-1.1942e-05	4.9176e+08	-3.3213e-07	4.9706e+08	-2.4372e-08
4.8662e+08	-1.0971e-05	4.9187e+08	-3.1325e-07	4.9717e+08	-2.3303e-08
4.8672e+08	-1.0087e-05	4.9197e+08	-2.9555e-07	4.9727e+08	-2.2285e-08
4.8682e+08	-9.2804e-06	4.9207e+08	-2.7894e-07	4.9738e+08	-2.1315e-08
4.8693e+08	-8.5448e-06	4.9218e+08	-2.6335e-07	4.9748e+08	-2.0393e-08
4.8703e+08	-7.8731e-06	4.9228e+08	-2.4873e-07	4.9759e+08	-1.9513e-08
4.8713e+08	-7.2593e-06	4.9238e+08	-2.3499e-07	4.9769e+08	-1.8675e-08
4.8723e+08	-6.6979e-06	4.9249e+08	-2.2209e-07	4.978e+08	-1.7878e-08
4.8733e+08	-6.1841e-06	4.9259e+08	-2.0996e-07	4.979e+08	-1.7116e-08
4.8744e+08	-5.7135e-06	4.9269e+08	-1.9855e-07	4.9801e+08	-1.6391e-08
4.8754e+08	-5.2822e-06	4.928e+08	-1.8783e-07	4.9811e+08	-1.5699e-08
4.8764e+08	-4.8865e-06	4.929e+08	-1.7773e-07	4.9822e+08	-1.5039e-08
4.8774e+08	-4.5234e-06	4.93e+08	-1.6824e-07	4.9832e+08	-1.441e-08
4.8785e+08	-4.1898e-06	4.9311e+08	-1.593e-07	4.9843e+08	-1.381e-08
4.8795e+08	-3.8831e-06	4.9321e+08	-1.5088e-07	4.9853e+08	-1.3238e-08
4.8805e+08	-3.6011e-06	4.9332e+08	-1.4295e-07	4.9863e+08	-1.2691e-08
4.8816e+08	-3.3415e-06	4.9342e+08	-1.3548e-07	4.9874e+08	-1.2168e-08
4.8826e+08	-3.1025e-06	4.9352e+08	-1.2843e-07	4.9884e+08	-1.1671e-08
4.8836e+08	-2.8821e-06	4.9363e+08	-1.2179e-07	4.9895e+08	-1.1194e-08
4.8846e+08	-2.6789e-06	4.9373e+08	-1.1552e-07	4.9905e+08	-1.0739e-08
4.8857e+08	-2.4915e-06	4.9383e+08	-1.0961e-07	4.9916e+08	-1.0304e-08
4.8867e+08	-2.3184e-06	4.9394e+08	-1.0403e-07	4.9926e+08	-9.8887e-09
4.8877e+08	-2.1585e-06	4.9404e+08	-9.8757e-08	4.9937e+08	-9.492e-09
4.8887e+08	-2.0106e-06	4.9415e+08	-9.3779e-08	4.9947e+08	-9.1128e-09
4.8898e+08	-1.8739e-06	4.9425e+08	-8.9076e-08	4.9958e+08	-8.7496e-09
4.8908e+08	-1.7474e-06	4.9435e+08	-8.4633e-08	4.9968e+08	-8.4025e-09
4.8918e+08	-1.6302e-06	4.9446e+08	-8.0431e-08	4.9979e+08	-8.0709e-09
4.8929e+08	-1.5216e-06	4.9456e+08	-7.6459e-08	4.9989e+08	-7.7534e-09
4.8939e+08	-1.421e-06	4.9467e+08	-7.2704e-08		
4.8949e+08	-1.3276e-06	4.9477e+08	-6.9148e-08		
4.8959e+08	-1.241e-06	4.9487e+08	-6.5784e-08		
4.897e+08	-1.1606e-06	4.9498e+08	-6.2596e-08		
4.898e+08	-1.0859e-06	4.9508e+08	-5.9584e-08		
4.899e+08	-1.0164e-06	4.9519e+08	-5.6727e-08		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ตารางความถี่ ระบบทีวีรวม

BAND	CH	Frequency Range	Video	Audio
	2	47-54	48.25	53.75
VHF BI	3	54-61	55.25	60.75
	4	61-68	62.25	67.75
FM		88-108	-	-
	S1	104-111	105.25	110.75
	S2	111-118	112.25	117.75
	S3	118-125	119.25	124.75
VHF	S4	125-132	126.25	131.75
Low S BAND	S5	132-139	133.25	138.75
	S6	139-146	140.25	145.75
	S7	146-153	147.25	152.75
	S8	153-160	154.25	159.75
	S9	160-167	161.25	166.75
	S10	167-174	168.25	173.75
	5	174-181	175.25	180.75
	6	181-188	182.25	187.75
	7	188-195	189.25	194.75
VHF	8	195-202	196.25	201.75
BIII	9	202-209	203.25	208.75
	10	209-216	210.25	215.75
	11	216-223	217.25	222.75
	12	223-230	224.25	229.75
	S11	230-237	231.25	236.75
	S12	237-244	238.25	243.75
	S13	244-251	245.25	250.75
VHF	S14	251-258	252.25	257.75
High S BAND	S15	258-265	259.25	264.75
	S16	265-272	266.25	271.75
	S17	272-279	273.25	278.75
	S18	279-286	280.25	285.75
	S19	286-293	287.25	292.75
	S20	293-300	294.25	299.75
	S21	302-310	303.25	308.75
	S22	310-318	311.25	316.75
	S23	318-326	319.25	324.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	S24	326-334	327.25	332.75
	S25	334-342	335.25	340.75
	S26	342-350	343.25	348.75
	S27	350-358	351.25	356.75
VHF	S28	358-366	359.25	364.75
Hyperband	S29	366-374	367.25	372.75
	S30	374-382	375.25	380.75
	S31	382-390	383.25	388.75
	S32	390-398	391.25	396.75
	S33	398-406	399.25	404.75
	S34	406-414	407.25	412.75
	S35	414-422	415.25	420.75
	S36	422-430	423.25	428.75
	S37	430-438	431.25	436.75
	S38	438-446	439.25	444.75
	S39	446-454	447.25	452.75
	S40	454-462	455.25	460.75
	S41	462-470	463.25	468.75
	21	470-478	471.25	476.75
	22	478-486	479.25	484.75
	23	486-494	487.25	492.75
	24	494-502	495.25	500.75
	25	502-510	503.25	508.75
	26	510-518	511.25	516.75
	27	518-526	519.25	524.75
	28	526-534	527.25	532.75
UHF Band I	29	534-542	535.25	540.75
	30	542-550	543.25	548.75
	31	550-558	551.25	556.75
	32	558-566	559.25	564.75
	33	566-574	567.25	572.75
	34	574-582	575.25	580.75
	35	582-590	583.25	588.75
	36	590-598	591.25	596.75
	37	598-606	599.25	604.75
	38	606-614	607.25	612.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	39	614-622	615.25	620.75
	40	622-630	623.25	628.75
	41	630-638	631.25	636.75
	42	638-646	639.25	644.75
	43	646-654	647.25	652.75
	44	654-662	655.25	660.75
	45	662-670	663.25	668.75
	46	670-678	671.25	676.75
	47	678-686	679.25	684.75
	48	686-694	687.25	692.75
	49	694-702	695.25	700.75
	50	702-710	703.25	708.75
	51	710-718	711.25	716.75
	52	718-726	719.25	724.75
	53	726-734	727.25	732.75
	54	734-742	735.25	740.75
	55	742-750	743.25	748.75
	56	750-758	751.25	756.75
UHF Band II	57	758-766	759.25	764.75
	58	766-774	767.25	772.75
	59	774-782	775.25	780.75
	60	782-790	783.25	788.75
	61	790-798	791.25	796.75
	62	798-806	799.25	804.75
	63	806-814	807.25	812.75
	64	814-822	815.25	820.75
	65	822-830	823.25	828.75
	66	830-838	831.25	836.75
	67	838-846	839.25	844.75
	68	846-854	847.25	852.75
	69	854-862	855.25	860.75
C-BABD	-	3.4-6.4 GHz	-	-
KU-BAND	-	10.9-14.5 GHz	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

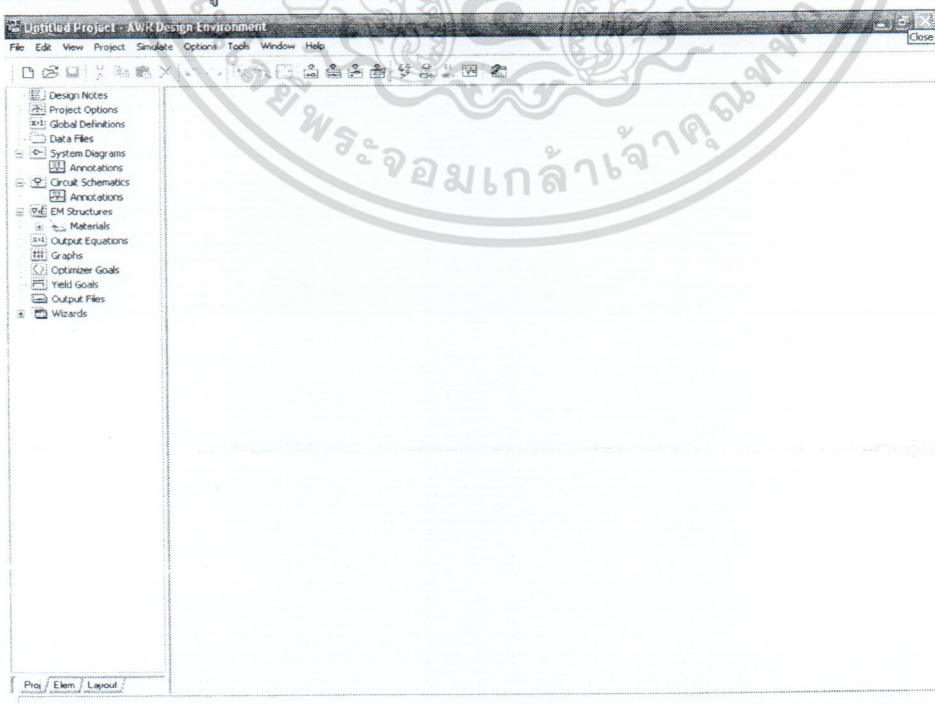
ภาคผนวก ค  
คู่มือการใช้งานโปรแกรม Microwave Office

การใช้โปรแกรม Microwave office 2004

การออกแบบโดยใช้โปรแกรมนั้นจะช่วยลดข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ เนื่องจากการคำนวณแต่ละสูตรของการคำนวณเป็นสูตรที่ยาวและซับซ้อน และข้อดีของการใช้โปรแกรมคือสามารถดูผลการตอบสนองของวงจรที่ออกแบบได้ จึงช่วยให้ผู้ออกแบบมองเห็นภาพรวมของวงจรที่เป็นส่วนสำคัญของการออกแบบ การใช้โปรแกรมจะให้ผลการตอบสนองของวงจรที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการ ส่วนการคำนวณบางครั้งจะพบว่าผลการตอบสนองของวงจรผิดไปจากที่ออกแบบไว้มากๆ การออกแบบด้วยโปรแกรมทำให้สามารถเปลี่ยนอุปกรณ์ได้ตลอดเวลา ซึ่งช่วยมากในกรณีที่ออกแบบมาแล้วแต่ค่าของอุปกรณ์ไม่มีขาย ในโปรแกรมสามารถแทนค่าของอุปกรณ์ที่ไม่มีด้วยค่าที่ใกล้เคียงแล้วทำการจำลองผลของวงจร แล้วเลือกค่าอุปกรณ์ที่ทำให้ผลการตอบสนองเหมาะสมกับวงจรที่ต้องการ และเนื่องจากการออกแบบโดยใช้โปรแกรมนั้นการออกแบบทุกชนิดของวงจรตรงความถี่นั้นจะออกแบบคล้ายๆ กันจึงขอยกตัวอย่างการออกแบบวงจรตรงความถี่ผ่านต่ำเป็นตัวอย่างของการออกแบบ

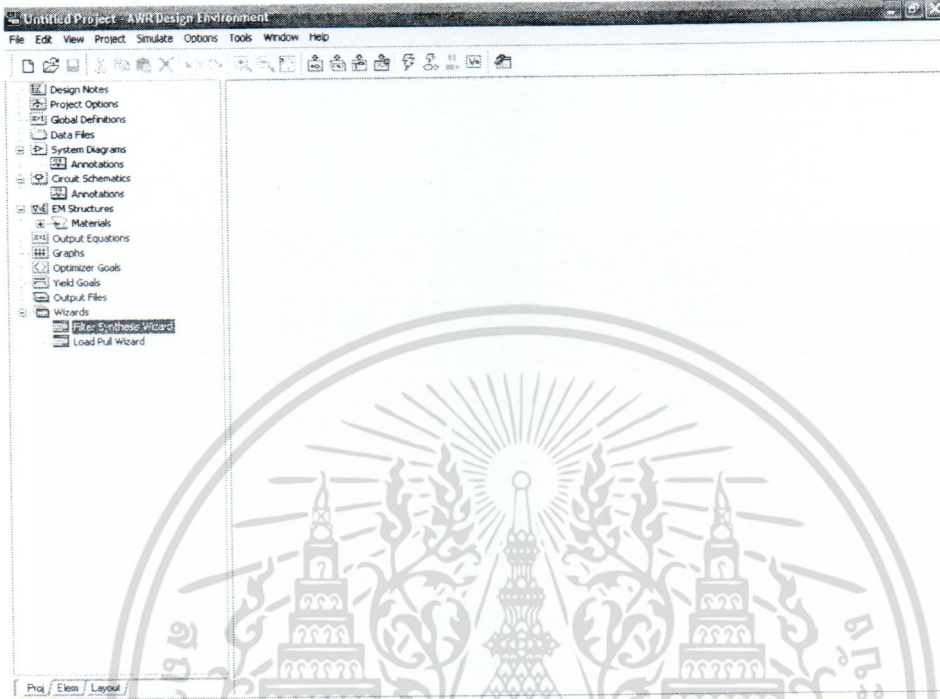
การออกแบบ Low-pass filter

โปรแกรมเป็นโปรแกรมเรียบง่ายโดยด้านบนใช้เป็นเมนูเหมือนกับโปรแกรมทั่วไป ส่วนกรอบด้านซ้ายมือเป็นเมนูที่รองรับการสร้างวงจร เช่น การสร้างกราฟการตอบสนอง

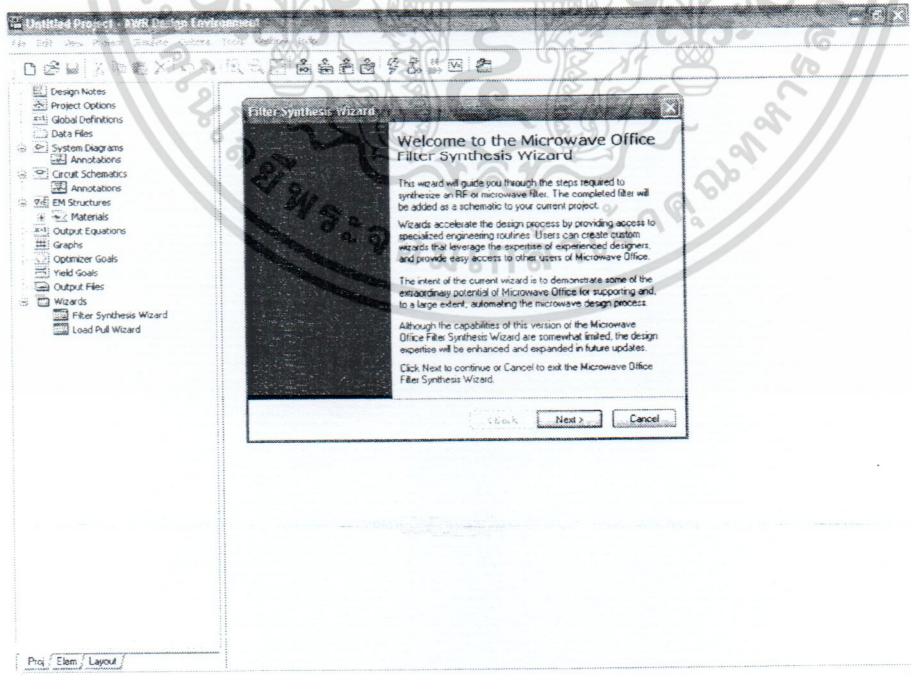


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 13 รูปหน้าต่างเริ่มเข้าโปรแกรม อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโดยการให้โปรแกรมคำนวณค่าอุปกรณ์ให้ทุกๆตัว สามารถเลือกได้ว่า จะเลือกแบบอุปกรณ์ขนานก่อนหรืออนุกรมก่อน และการทำให้โปรแกรมคำนวณโปรแกรมจะสร้างกราฟการตอบสนองให้ด้วย

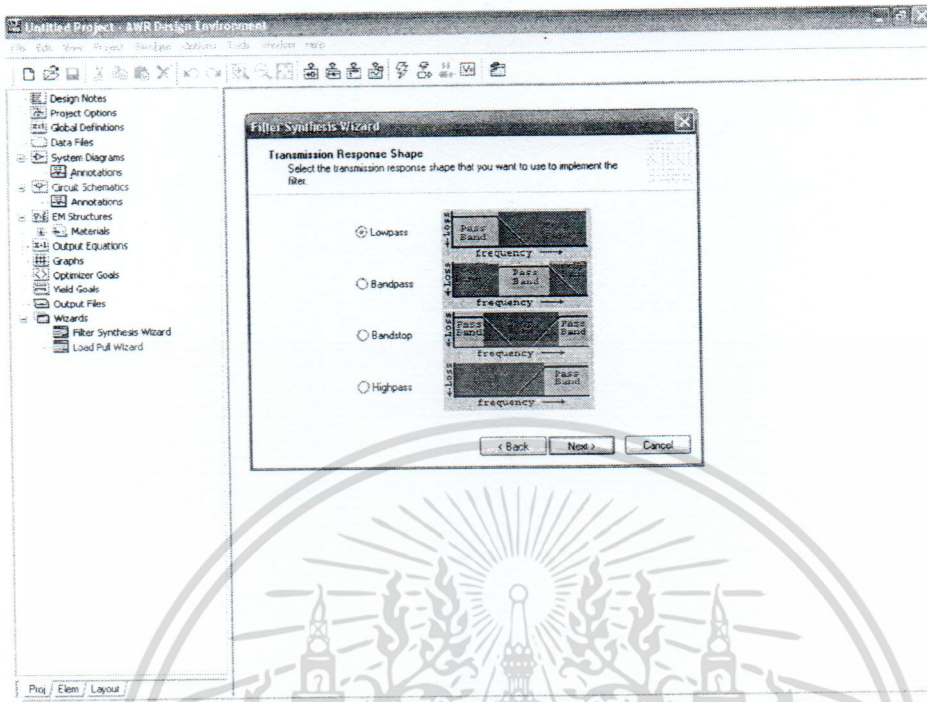


รูปที่ 13.2 รูปการออกแบบโดยใช้ Wizards ออกแบบโดยใช้โปรแกรมคำนวณค่าอุปกรณ์ให้

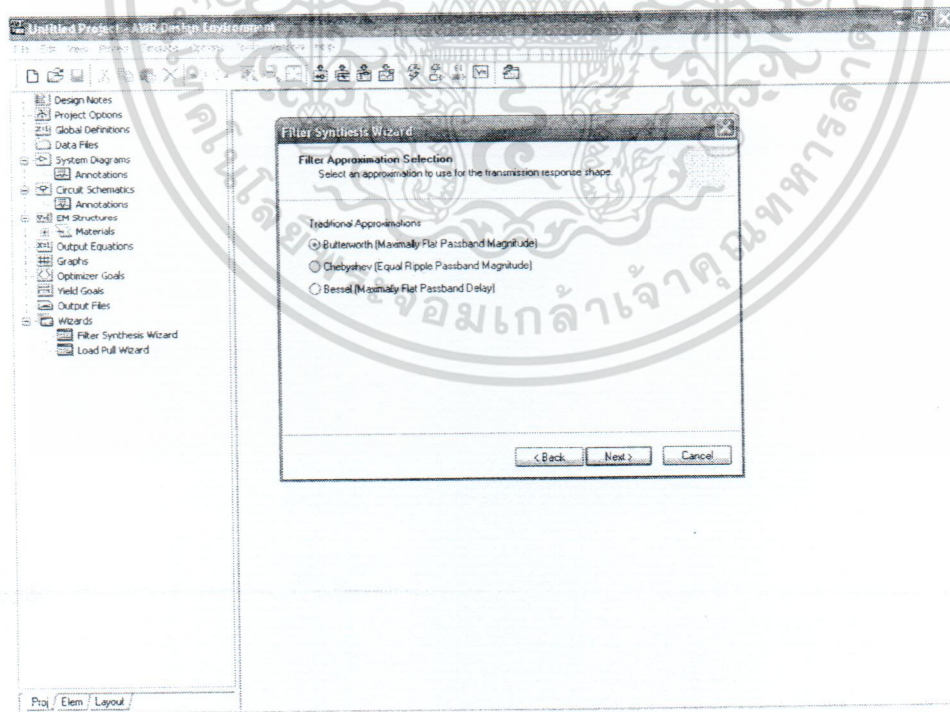


รูปที่ 13.3 รูปหน้าต่างต้อนรับของ Wizards

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

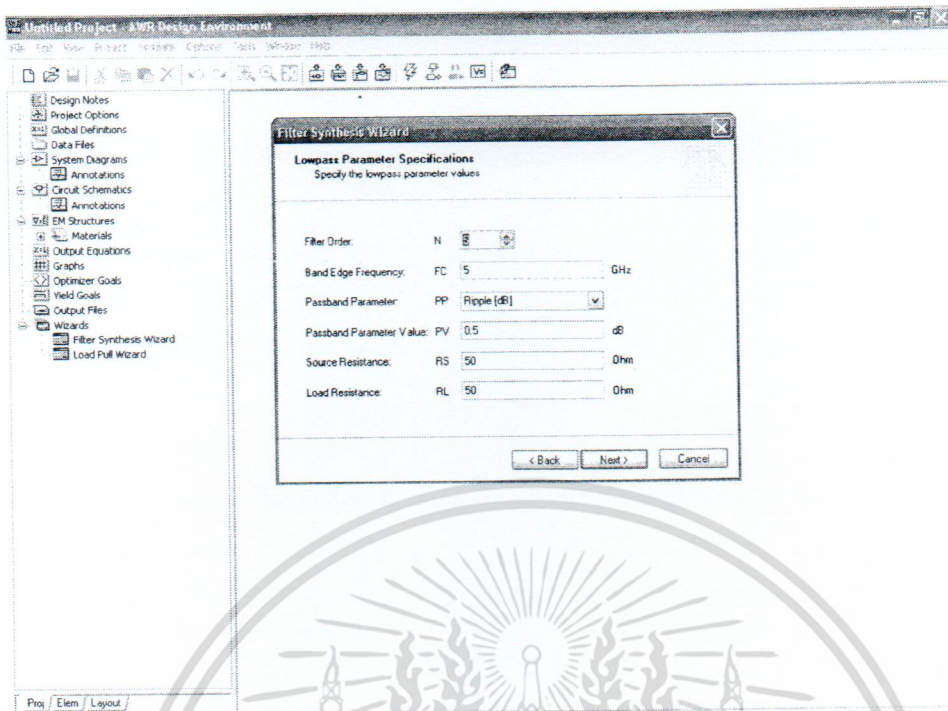


รูปที่ 13.4 รูปหน้าต่างในการเลือกชนิดของวงจรกรองความถี่ โดยแต่ละชนิดก็จะมีข้อกำหนดความถี่และรายละเอียดอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไป

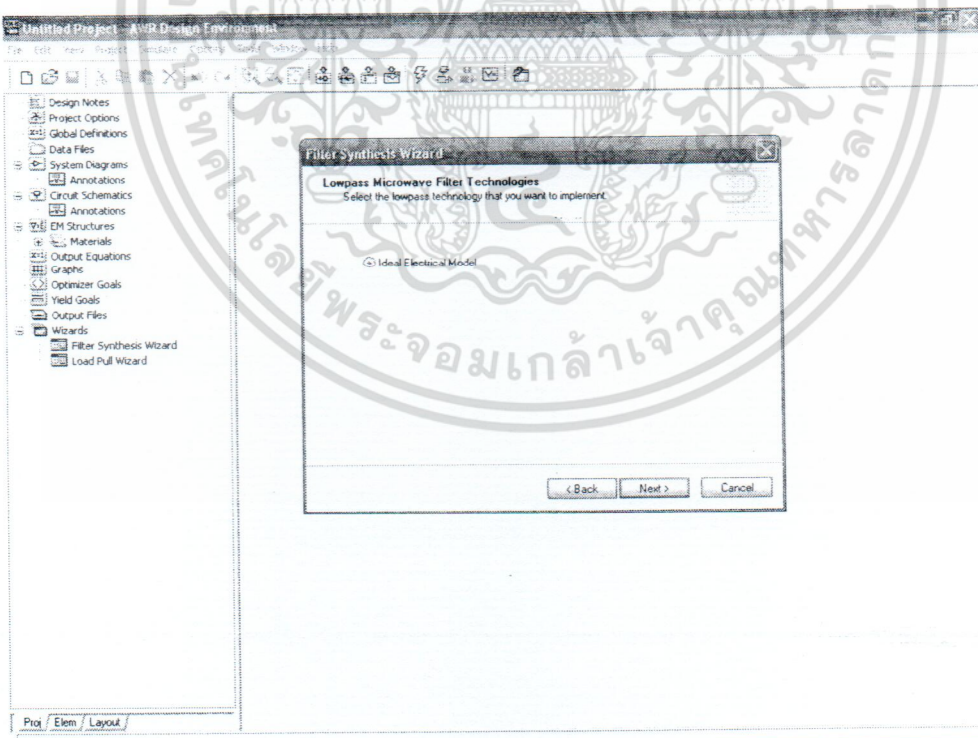


รูปที่ 13.5 รูปการเลือกรูปแบบของสมการที่คำนวณ ส่วนมากจะเลือกสมการแบบ Chebyshev มากกว่าสมการอื่นๆ เนื่องจากให้การตอบสนองที่ดีและเร็วกว่าสมการอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

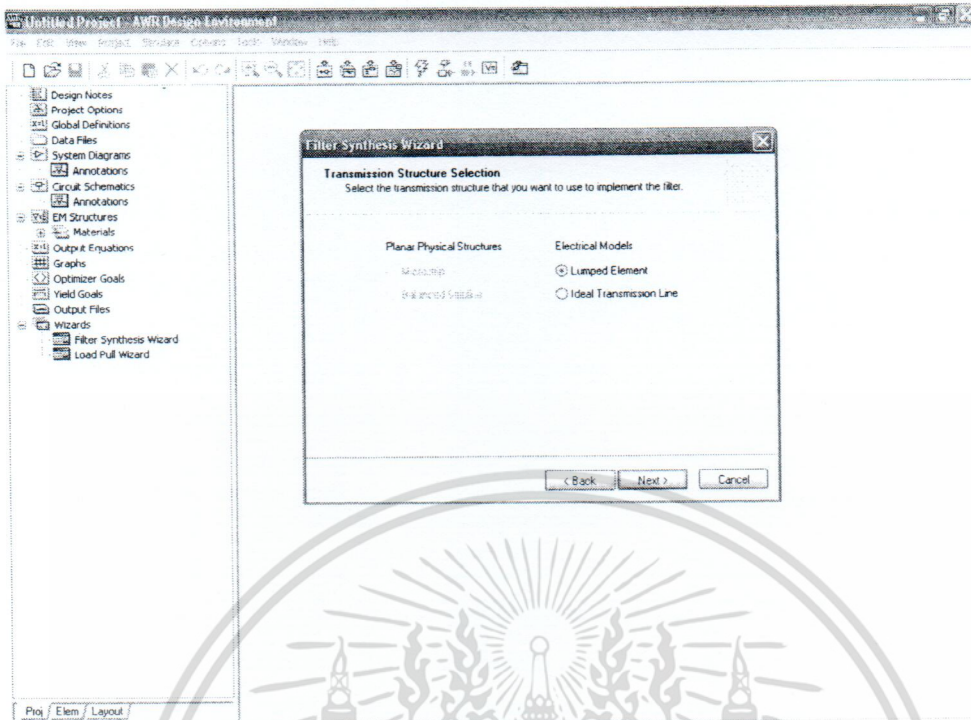


รูปที่ 13.6 รูปการกำหนดค่าต่างๆ ให้วงจรกรอง เช่น ความถี่ อันดับของวงจร เลือกโหนดของวงจร และเลือกค่า Ripple ซึ่งจะมีผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม

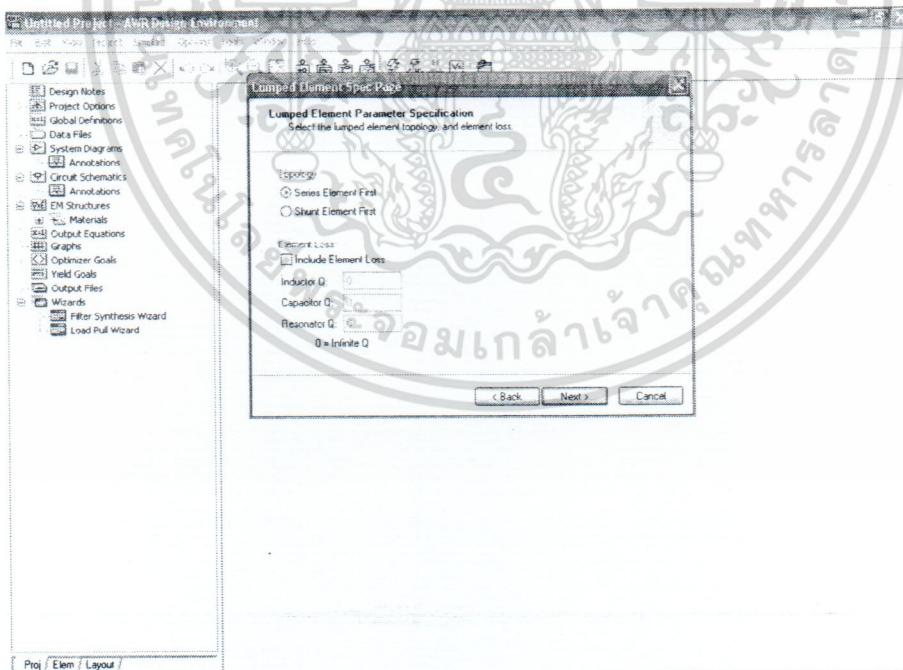


รูปที่ 13.7 รูปโปรแกรมเลือกอุปกรณ์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการลดทอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

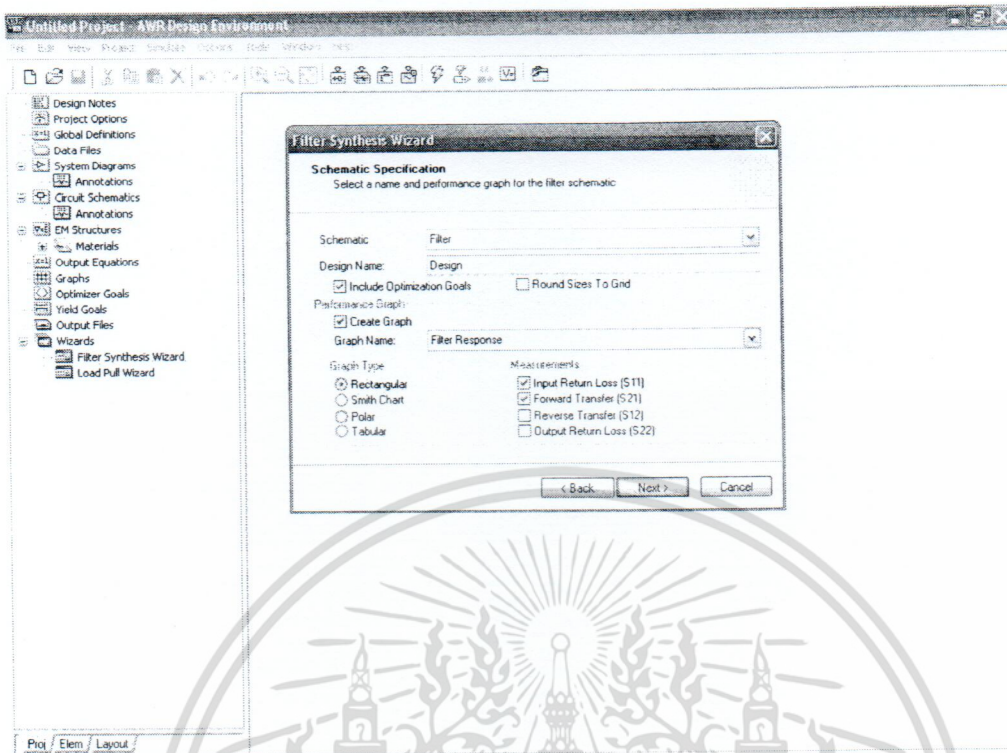


รูปที่ 13.8 รูปการเลือกอุปกรณ์เป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะต้องเลือก Electrical Models เป็น Lumped Element

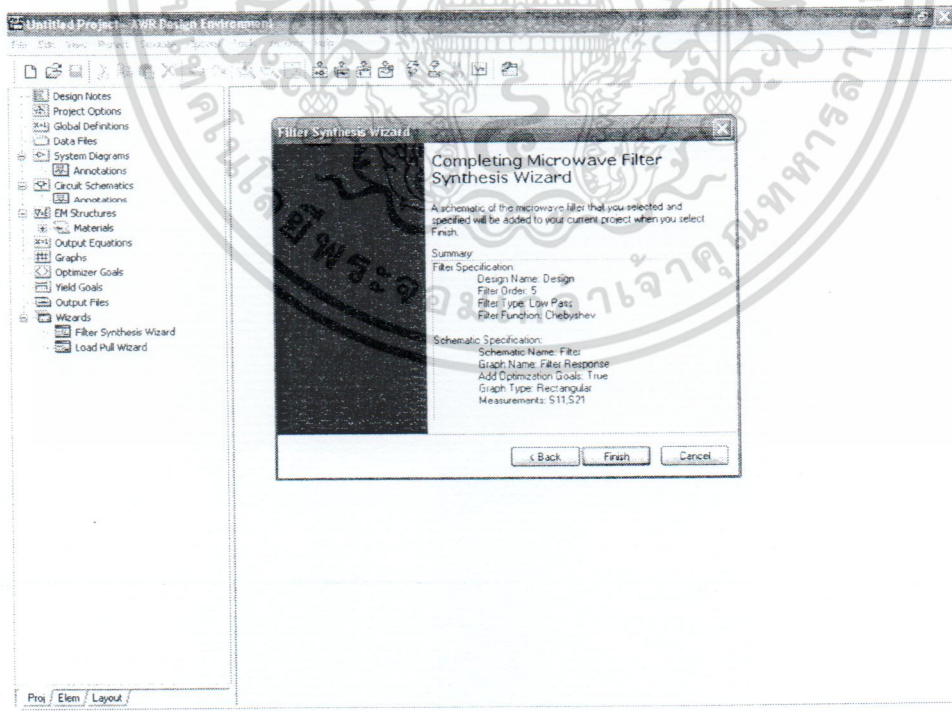


รูปที่ 13.9 รูปการเลือกอุปกรณ์ตัวแรกให้ขนานหรืออนุกรม และเลือกการสูญเสียของอุปกรณ์แต่ส่วนมากการใช้โปรแกรมจะไม่ใส่ค่าการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

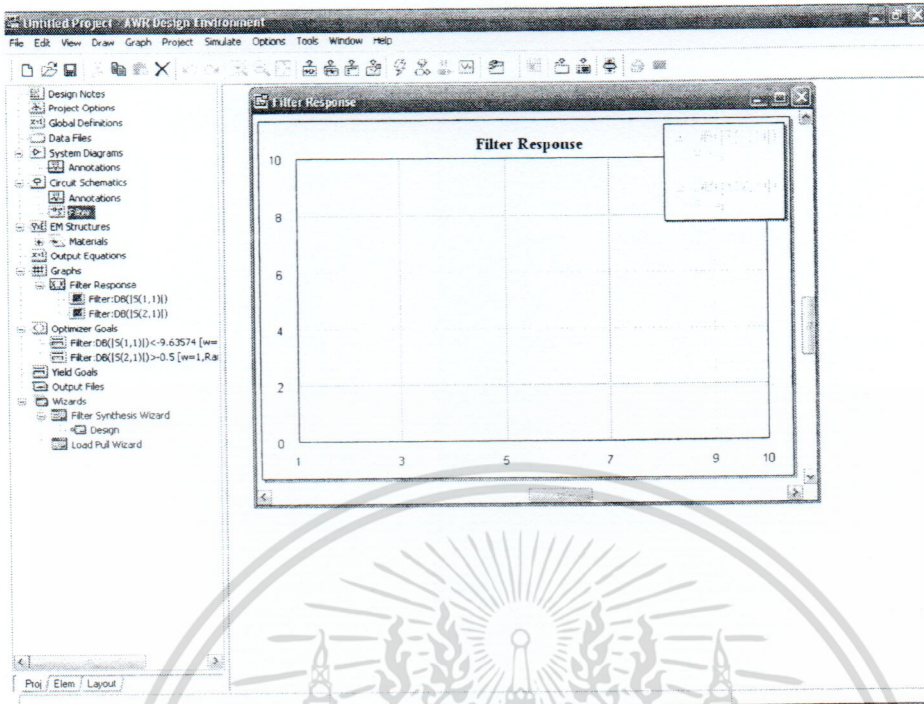


รูปที่ 13.10 รูปการตั้งชื่อของวงจรและกราฟ เลือกชนิดกราฟผลการตอบสนองและรายละเอียดของกราฟชนิดนั้นๆ

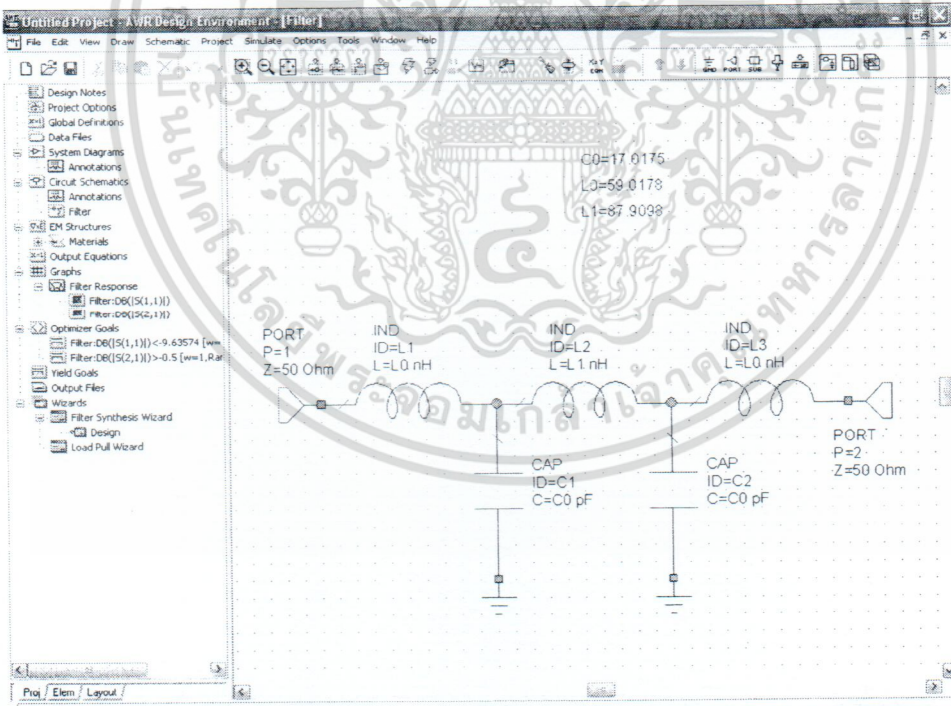


รูปที่ 13.11 รูปโปรแกรมรายงานรายละเอียดของวงจรที่ป้อนให้แก่โปรแกรมเพื่อทำการคำนวณและชื่อต่างๆของวงจรที่ตั้งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

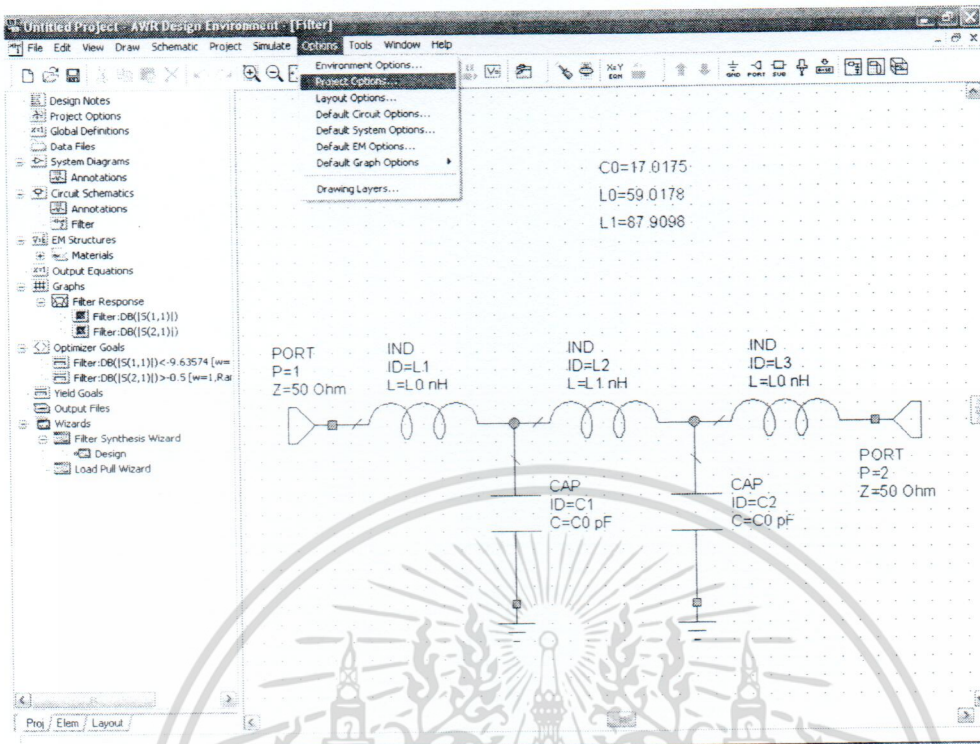


รูปที่ 13.12 รูปโปรแกรมเมื่อออกแบบสมบูรณ์

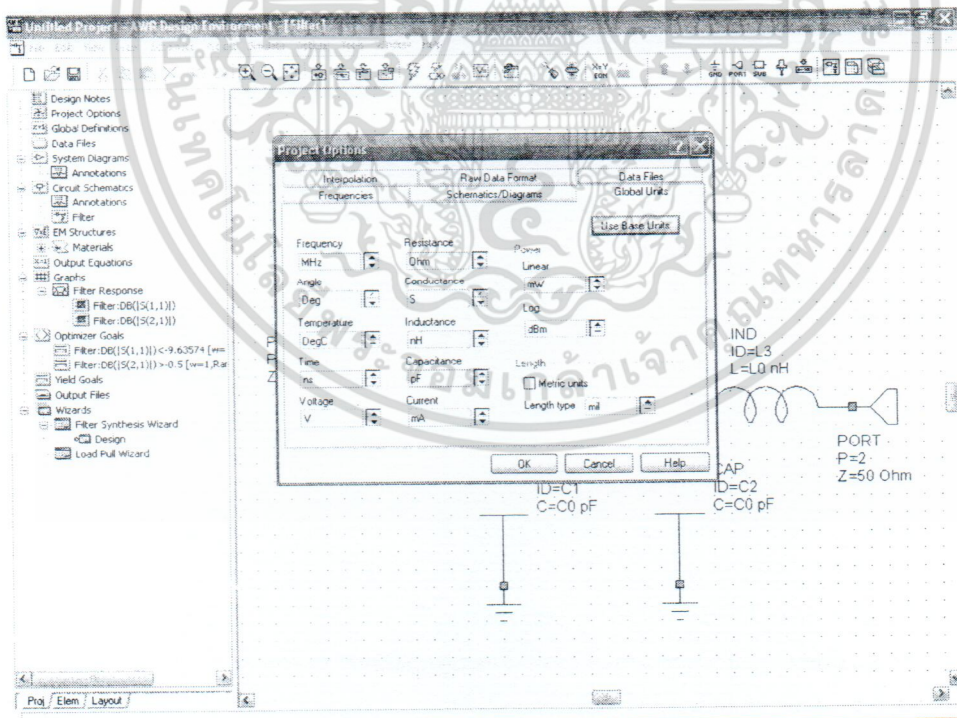


รูปที่ 13.13 รูปวงจรที่ได้เมื่อออกแบบสมบูรณ์จะสังเกตว่าค่าของอุปกรณ์จะอยู่ด้านล่างของวงจร แต่สามารถนำค่านั้นมาใส่อุปกรณ์แต่ละตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

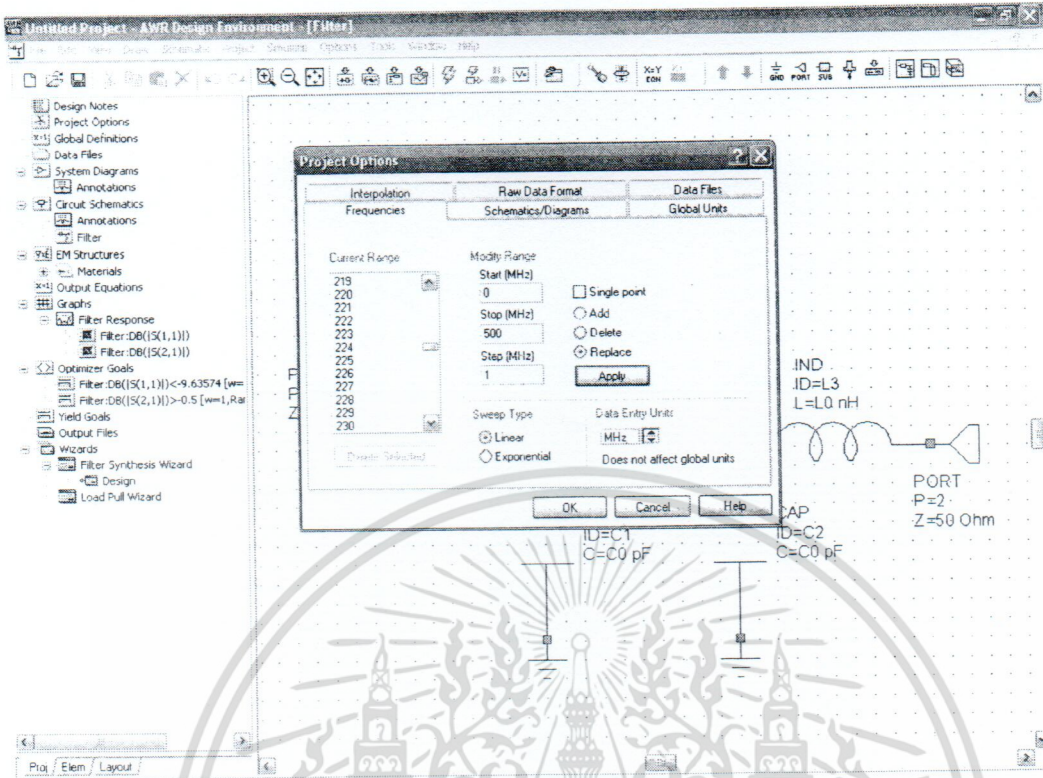


รูปที่ 13.14 รูปการตั้งค่าให้วงจรเพื่อที่จะดูกราฟการตอบสนอง

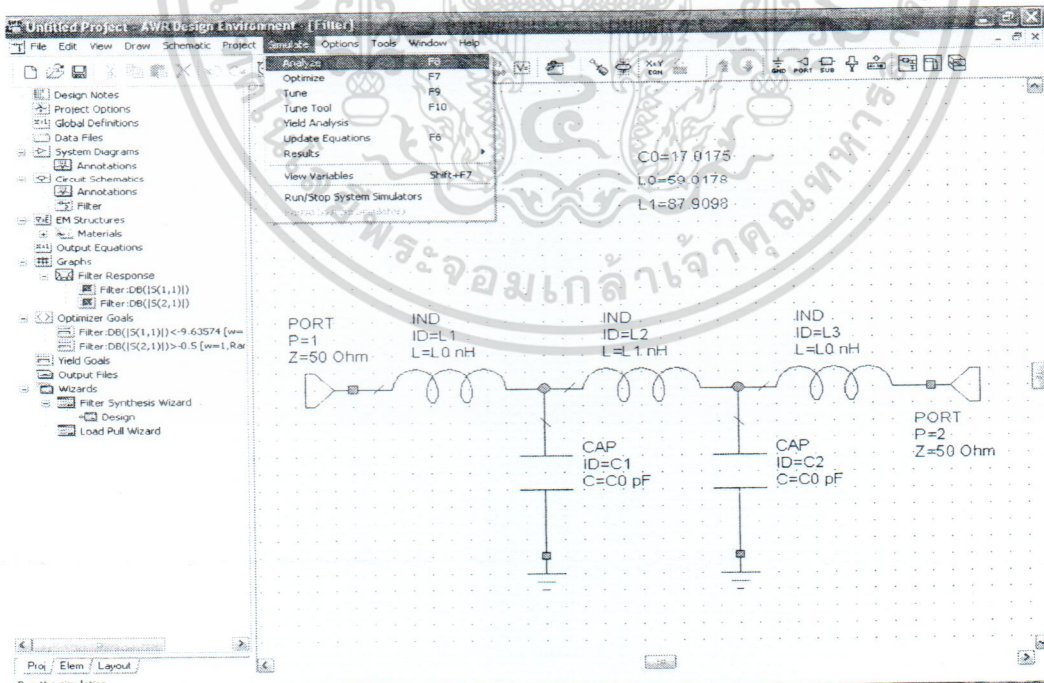


รูปที่ 13.15 รูปการกำหนดความถี่ให้เหมาะสมกับวงจรว่าจะกำหนดหน่วยของความถี่ที่ใช้ในโปรแกรมเป็นหน่วยเล็กหรือใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

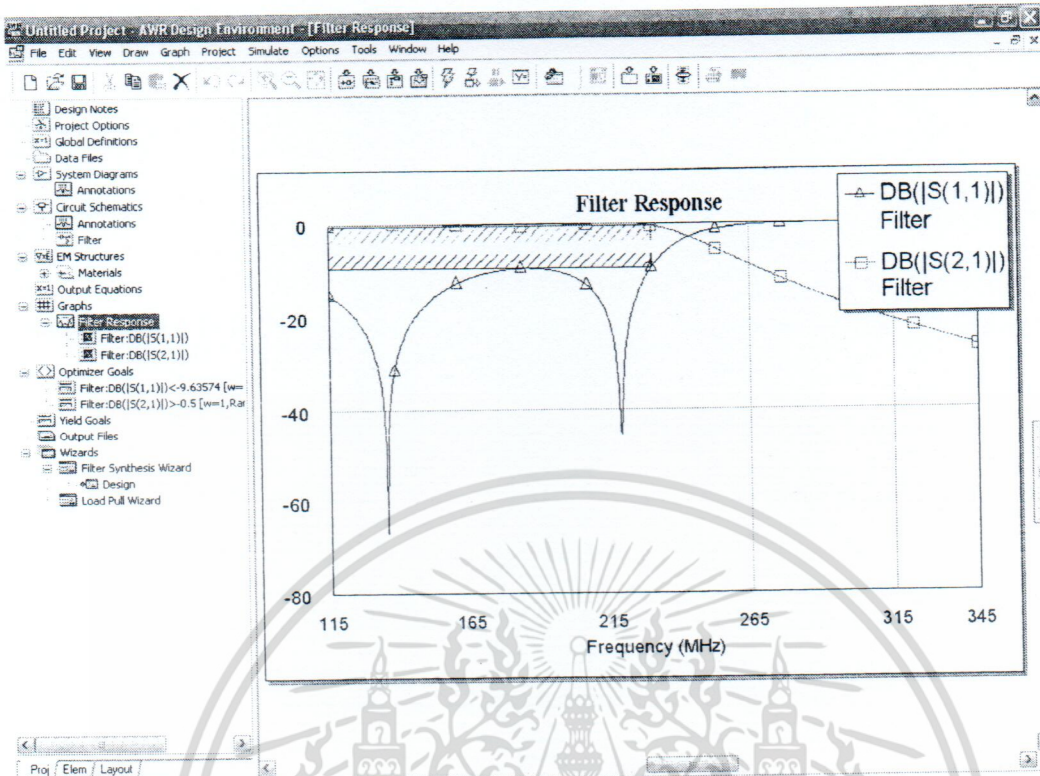


รูปที่ 13.16 รูปการเลือกความถี่ให้โปรแกรมแสดงการตอบสนอง โดยการกำหนดความถี่เริ่มต้นและสิ้นสุด และความละเอียดของความถี่



รูปที่ 13.17 รูปการวิเคราะห์วงจรเพื่อดูกราฟการตอบสนองของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13.18 รูปกราฟการตอบสนองที่ได้จากโปรแกรม โดยการดูจาก S21 ได้โดยค่าจะต้องใกล้เคียงกับศูนย์ที่ความถี่ที่ต้องการจึงจะถือว่าเป็นวงจรที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติคณะผู้วิจัย

### 1. หัวหน้าโครงการวิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายสุรพล บุญจันทร์

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 08 1630 2454 โทรสาร 0 2326 4554

E-mail kbsurapo@kmitl.ac.th, surapol@telecom.kmitl.ac.th

#### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สจล.
อส.บ.	เทคโนโลยีโทรคมนาคม	สจล.

#### ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1. เครื่องเพิ่มออกซิเจนควบคุมการทำงานแบบไร้สายแบบประหยัดพลังงาน

### 2. ผู้ร่วมวิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 0 2737 3000 ext. 3349 โทรสาร 0 2326 4554

E-mail kbpsit@kmitl.ac.th, psit@telecom.kmitl.ac.th

#### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ
วศ.ด.	วิศวกรรมไฟฟ้า	Mie University
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า โทรคมนาคม	สจล.

#### ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1. Proposal of Improved PTS method for OFDM Signal in the Multi-path Fading Channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ผู้ร่วมวิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายชูชาติ พุดระกุล

ตำแหน่ง วิศวกร ระดับ 6

หน่วยงาน สำนักงานคณบดี (งานเทคโนโลยีสารสนเทศ) คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 08 9920 5916 โทรสาร 0 2739 2471

E-mail kpuchuch@kmitl.ac.th

#### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สจล.
อส.บ.	เทคโนโลยีโทรคมนาคม	สจล.

#### ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1. เครื่องเพิ่มออกซิเจนควบคุมการทำงานแบบไร้สายแบบประหยัดพลังงาน

### 4. ผู้ร่วมวิจัย

#### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย

ตำแหน่ง วิศวกร

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 08 3138 0728 โทรสาร 0 2326 4554

E-mail kbpisit@kmitl.ac.th, pisit@telecom.lmitl.ac.th

#### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมสารสนเทศ	สจล.
วศ.บ.	วิศวกรรมสารสนเทศ	สจล.

#### ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1. Performance Analysis of Ultra Wideband Impulse Radio Propagation Channel with Laptop Computer in an Indoor Environment for Personal Area Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



