

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นของสะพาน

ENERGY HARVESTING FROM BRIDGE VIBRATIONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นของสะพาน

ENERGY HARVESTING FROM BRIDGE VIBRATIONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่จำเป็นต้องอ้างอิงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ENERGY HARVESTING FROM BRIGDE VIBRATIONS



Nawanyut  
Nattapong  
Thongchai

Saenchit  
Muangmor  
Thongkum

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นของสะพาน

ENERGY HARVESTING FROM BRIDGE VIBRATIONS

ผู้จัดทำ นายณวันยุทธ แสนจิตร 52010299

นายณัฐพงศ์ เหมือนหม้อ 52010330

นายรัชชัย ทองคำ 52010430

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ดอน อิศรากร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสิ้นของสะพาน

โดย

นายฉวีวันยุทธ	แสนจิตร	52010299
นายฉวีรุ่งพงศ์	เหมืองหม้อ	52010330
นายธงชัย	ทองคำ	52010430

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ดอน

อิสรากร

อาจารย์สองเมือง

นันทขว้าง

ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการตรวจจับระดับการสิ้นของสะพานเพื่อนำไปออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน ให้กับเซนเซอร์ใดๆ เพื่อการตรวจสอบความหนาแน่นของการจราจร และความสมบูรณ์ของโครงสร้างของ สะพาน การให้พลังงานเซนเซอร์ตรวจจับต่างๆ นั้นทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสะพาน และช่วยพัฒนาระบบเครือข่ายในการส่งข้อมูล ทำให้สะดวกในการตรวจสอบ จากผลการวัดระดับการสิ้นบริเวณสะพานนั้น ระดับการสิ้นบนสะพาน หรือระดับการสิ้นบนถนนนั้นมีการสิ้นที่น้อยเกินไปไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ในทางตรงกันข้ามระดับการสิ้นที่บริเวณราวสะพานนั้น มีคุณสมบัติและเนื้อที่เพียงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสิ้นของเพ็ชโซอิเล็กทริกจึงถูกออกแบบขึ้นมา ขั้นตอนดำเนินการ เริ่มจากการออกสำรวจถนนตามพื้นที่ต่างๆ ในท้องถิ่น เพื่อตรวจวัดระดับการสิ้นในแต่ละพื้นที่ และนำมาวิเคราะห์ว่า ระดับการสิ้นในพื้นที่ไหนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ ได้มากที่สุด หลังจากที่ได้พบพื้นที่ ที่ต้องการแล้วจึงเริ่มเก็บข้อมูลความถี่ แล้วจึงนำไปออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และปรับปรุง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ให้สามารถ ทำให้เกิดพลังงานได้สูงสุดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ENERGY HARVESTING FROM BRIDGE VIBRATIONS

By

Mr. Nawanyut Saenchit 52010299

Mr. Nattapong Muangmor 52010330

Mr. Thongchai Thongkum 52010430

Advisor

Dr. Don Isarakorn

Mr. Songmaung Nandrakwang

Academic Year 2012

## ABSTRACT

This thesis presents on vibrations levels detected on bridge as a potential energy source for any sensors. Monitoring the traffic and the structural health of bridge requires numerous sensors. Powering these remote and partially embedded sensors from ambient energies will reduce maintenance costs, and improve the sensor network performance. The measurement results showed that the vibrations at any location on the bridge are too small for useful vibrations harvesting. In contrast, the bridge edge features usable vibrations and sufficient mounting space. For this application site, a robust piezoelectric vibrations harvester was designed. The project has been conducted as in the following steps. First, survey any local street to measure frequency. Second, analyze those frequencies to find the useful vibrations levels. After that, use those frequencies to design energy harvester. Finally, improve energy harvester for maximum performance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญาภิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จาก ดร. ดอน อิศรากร และอาจารย์ สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาโดยตลอด ตั้งแต่ต้นรวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความสนใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่เสมอ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้



ผู้จัดทำ

นายณวันยุทธ แสนจิตร

นายณัฐพงศ์ เหมือนหม้อ

นายธงชัย ทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ	1
1.3 ขั้นตอนการค้นคว้าและจัดทำโครงการ	1
1.4 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เพียโซอิเล็กทริก	3
2.2 ความถี่เรโซแนนซ์	5
2.3 การหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์	6
2.4 เครื่องมือวัดความถี่ (Accelerometer)	7
2.5 เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope)	8
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	11
3.1 การวัดการสั่นสะเทือนของสะพาน	11
3.2 การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	14
3.2.1 การเลือกวัสดุ	15
3.2.2 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	15
3.2.2.1 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ	15
3.2.2.2 การสร้างโครงสร้างต่างๆ	15
3.2.2.3 การแบ่งโครงสร้างเป็นหน่วยเล็กๆ	20
3.2.3 การหาค่าความถี่ของโครงสร้าง	20
3.2.4 การหาค่าการก้ำกั้สูงสุดของโครงสร้าง ณ ความถี่ใดๆ	21
3.2.5 การหาค่าความเค้นของโครงสร้างใดๆ	24
3.2.6 การปรับเปลี่ยนความถี่ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	27
3.2.6.1 การยึดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	27
3.2.6.2 การตีความ ณ จุดที่เกิดการก้ำกั้สูงสุด	29
3.3 การทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	29
3.3.1 การทดสอบหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	29
3.3.2 การทดสอบวัดพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	31
4.1 ผลการทดลองการสิ้นสะท้อนของสะพาน	31
4.2 ความถี่และแอมพลิจูดของรถแต่ละประเภท	34
4.2.1 ความถี่ของสะพานเมื่อมีรถวิ่งผ่าน	34
4.2.2 การวิเคราะห์ความถี่ของรถแต่ละประเภท	37
4.3 ผลการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	45
4.3.1 วัสดุที่ใช้ในการจำลองโครงสร้าง	45
4.3.2 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	46
4.3.3 การกำจัดสูงสุดของโครงสร้าง ณ ความถี่เรโซแนนซ์	49
4.3.4 ค่าความเค้นของโครงสร้างรูปทรงต่างๆ	53
4.3.5 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป	57
4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	59
4.4.1 ผลการทดสอบหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	59
4.4.2 ผลการเปรียบเทียบความถี่ของอุปกรณ์และความถี่ของสะพาน	60
4.4.3 ผลการทดสอบวัดพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	62
<b>บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป</b>	65
5.1 สรุปผลการทดลอง	65
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข	65
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	66
<b>ภาคผนวก</b>	67
<b>ภาคผนวก ก</b>	68
<b>ภาคผนวก ข</b>	71
<b>ภาคผนวก ค</b>	79
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	4
2.2	โพลาริเซชันทางไฟฟ้า	4
2.3	สะพานทาโคมาแนโรน อเมริกา	5
2.4	วงจรสำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ของ Piezoelectric	6
2.5	กราฟแสดง Resonance frequency และ Anti-resonance frequency	7
2.6	เครื่องมือวัดความเร่ง	8
2.7	สัญญาณจากการวัดแรงดันไฟฟ้า	8
2.8	เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า	9
3.1	สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	11
3.2	ตำแหน่งที่วัดการสั่นสะเทือน	12
3.3	กราฟก่อน และหลังแปลง Fast Fourier Transform	13
3.4	โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0	14
3.5	ช่อง ANSYS Command Prompt	14
3.6	ตัวอย่างการใช้คำสั่งสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมในโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0	16
3.7	ตัวอย่างการใช้คำสั่งสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมในโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0	16
3.8	ตัวอย่างการใช้คำสั่งสร้างปริมาตรจากพื้นที่รูปหลายเหลี่ยม	18
3.9	การค้นหาค่าสั่งในการสร้างโครงสร้างต่างๆ	19
3.10	การแบ่งโครงสร้างเป็นหน่วยเล็กๆ	20
3.11	ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างที่ออกแบบ	21
3.12	การหาค่าการกำจัดที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์	23
3.13	ตัวอย่างกราฟแสดงการกำจัด ณ ช่วงความถี่ที่เลือก	24
3.14	ลูกศรแสดงการใส่การกำจัดบนโครงสร้าง	24
3.15	การหาค่าความเค้นของโครงสร้างใดๆ	26
3.16	ตัวอย่างโครงสร้างที่มีการแสดงค่าความเค้นโดยที่สียิ่งแดงยิ่งมีค่าความเค้นมาก	26
3.17	อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป โดยที่สีฟ้าคือวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และสีบานเย็นคือวัสดุอื่น	27
3.18	การยึดโครงสร้างในแบบต่างๆ	28
3.19	การเปลี่ยนความยาวของโครงสร้าง	28
3.20	โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปที่ติดมวล	29
3.21	โครงสร้างอะคริลิกยึดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	30
4.1.1	ผลการทดลองบริเวณพื้นถนนบนสะพาน	31
4.1.2	ผลการทดลองบริเวณราวสะพานแนวตั้ง	32
4.1.3	ผลการทดลองบริเวณราวสะพานแนวนอน	33
4.2.1	ผลการทดลองครั้งที่ 1 บริเวณราวสะพานแนวนอน	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2 บริเวณราวสะพานแวนอน	35
4.2.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3 บริเวณราวสะพานแวนอน	36
4.2.4 ผลการทดลองครั้งที่ 4 บริเวณราวสะพานแวนอน	36
4.2.5 ผลการทดลองครั้งที่ 5 บริเวณราวสะพานแวนอน	37
4.2.6 ผลการทดลองวัดความถี่ของสะพานเมื่อมีรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่าน	43
4.2.7 ผลการทดลองวัดความถี่ของสะพานเมื่อมีน้ำหนักเบาวิ่งผ่านทั้งจำนวน 1 คันและหลายคัน	44
4.3.1 รูปจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน	45
4.3.2 Shim Stainless Steel 304	46
4.3.3 โครงสร้างรูปทรงต่างๆ ที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever	47
4.3.4 โครงสร้างรูปทรงต่างๆ ที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge	48
4.3.5 กราฟแสดงการกำจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever	50
4.3.6 กราฟแสดงการกำจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge	52
4.3.7 ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever	54
4.3.8 ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge	56
4.3.9 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป	57
4.3.10 ผลการเปลี่ยนความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างโดยการยึดโครงสร้าง	58
4.4.1 กราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์	59
4.4.2 กราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์	60
4.4.3 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานเมื่อทำการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุดและติดมวล 10 กรัม	60
4.4.4 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลาเมื่อทำการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	61
4.4.5 กราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์	61
4.4.6 กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่	62
4.4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดลองครั้งที่ 1	63
4.4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดลองครั้งที่ 2	63
4.4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดลองครั้งที่ 3	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 1	38
4.2 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 2	39
4.3 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 3	40
4.4 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 4	40
4.5 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 5	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ในชีวิตประจำวันเราสามารถสังเกต และรับรู้ถึงการสั่นของวัตถุต่างๆ ซึ่งการสั่นเหล่านั้นมักจะเกิดขึ้นบ่อยครั้งซึ่งในการศึกษาวิจัยนั้นทางกลุ่มได้เห็นว่า การสั่นบนสะพานมีหลายลักษณะที่น่าสนใจ โครงสร้างพื้นฐานของสะพานนั้นสามารถที่จะตอบสนองต่อการกระทำต่างๆ จากสิ่งแวดล้อมรอบด้านได้ง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างสะพาน และอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นบนสะพาน เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกของประชาชน ซึ่งระบบตรวจสอบดังกล่าวจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัดสภาพของสะพาน ซึ่งในปัจจุบันการพัฒนาในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์การสื่อสารแบบไร้สาย ทำให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็ก แต่สามารถใช้ส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุต่างๆ จะสามารถช่วยลดปริมาณการสูญเสีย และช่วยลดปัญหาการติดขัดของการจราจรได้

ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนสะพานนั้นบางระบบอาจถูกฝังอยู่ในโครงสร้างของสะพานเพื่อให้ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และอัตราการดูแลรักษาต่างๆ ทำให้ยากแก่การเข้าถึงตัวเครือข่ายเซ็นเซอร์ เพราะฉะนั้นแหล่งพลังงานไร้สายเช่น แบตเตอรี่จึงมีความจำเป็น แต่แบตเตอรี่เองก็จำเป็นต้องเปลี่ยนเมื่อพลังงานหมดไป ดังนั้นการแก้ปัญหาเรื่องความยากในการเข้าถึงระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์คือการนำแหล่งกำเนิดพลังงานอื่นมาทดแทน โดยมุ่งเน้นไปที่การสั่นของสะพาน

### 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

1. เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนของสะพาน
2. เพื่อสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของสะพาน
3. เพื่อศึกษาและสร้างอุปกรณ์ที่สามารถตรวจสอบการชำรุดของสะพาน

### 1.3 ขั้นตอนการค้นคว้าและจัดทำโครงการ

ศึกษาการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกชั้นพื้นฐาน ทำการวัดการสั่นของสะพานโดยใช้ การวิเคราะห์การสั่นในกรณีต่างๆ เช่น ในขณะที่สะพานไม่มีรถวิ่งผ่าน ขณะที่รถประเภทต่างๆผ่านขณะที่รถเต็มสะพาน โดยที่บันทึกภาพเคลื่อนไหว ไว้ในขณะที่ทำการวัด หลังจากที่ได้ข้อมูลความเร่งการสั่นของสะพานมาแล้วจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ โดยทำ Fast Fourier transform เพื่อหาว่า ความถี่ไหนของสะพานที่มี แอมพลิจูดสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ แล้วจึงนำกราฟ Fast Fourier transform ที่ได้มาเทียบกับภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกไว้เพื่อที่จะนำไปแยกดูว่ารถแต่ละประเภททำให้สะพานสั่นที่ความถี่เท่าไร เมื่อได้ความถี่ของรถแต่ละประเภทมาแล้วจึงนำข้อมูลมาสรุปเพื่อทำการออกแบบในขั้นตอนต่อไป

ออกแบบและจำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 โดยการทดลองเปลี่ยนแปลง รูปร่างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น รูปหลายเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมผืนผ้า และ สี่เหลี่ยมคางหมู แล้วจึงนำรูปร่างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน มายึดในรูปแบบ Cantilever และ Bridge เพื่อทดสอบว่าการยึดในแต่ละรูปแบบมีความถี่ต่างกันอย่างไร และทดสอบว่า รูปร่างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่างๆ มีความถี่ต่างกันอย่างไร แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้นำไปจำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ให้ได้ความถี่ที่ตรงกับความถี่การสั่นของสะพาน

หลังจากที่ได้จำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในความถี่ที่ต้องการ จะทำให้เราทราบขนาดของ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งสามารถนำขนาดและความถี่ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ไปจำลองหา การกระจัด จากการทดลองใส่แรงไปกระทำ ณ จุดที่คาดว่าจะเกิดการกระจัดสูงสุดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน หลังจากทราบค่า การกระจัด ที่เกิดขึ้นแล้ว จึงนำค่าการกระจัดนั้น ไปจำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน โดยการทดลองใส่การกักจัดลงไป ณ จุดเดิมเพื่อต้องการหาความเค้นของ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่า อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน รูปแบบไหนที่ให้ความเค้นมากและทั่วถึงมากที่สุด เพื่อที่จะให้ เพียโซอิเล็กทริก ได้รับแรงทั่วถึง

หลังจากที่จำลองอุปกรณ์แล้วนำมาออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ทำชุดทดลอง ทดสอบอุปกรณ์ และนำอุปกรณ์ไปติดตั้งที่สะพานเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์

#### 1.4 รายละเอียดของปฏิญานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการค้นคว้าและจัดทำโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของปฏิญานิพนธ์ของแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเพียโซอิเล็กทริก ความถี่เรโซแนนซ์ การหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ เครื่องมือวัดความถี่และเครื่องแสดงคลื่น กระแสไฟฟ้า

บทที่ 3 วิธีการทดลอง กล่าวถึงการวัดการสั่นสะเทือนของสะพาน การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและการทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

บทที่ 4 ผลการทดลอง กล่าวถึงผลการทดลองการสั่นสะเทือนของสะพาน ความถี่และแอมพลิจูดของแต่ละประเภท ผลการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและผลการทดสอบอุปกรณ์การทดลอง

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป จะสรุปผลการดำเนินการงาน ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการปรับปรุงพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

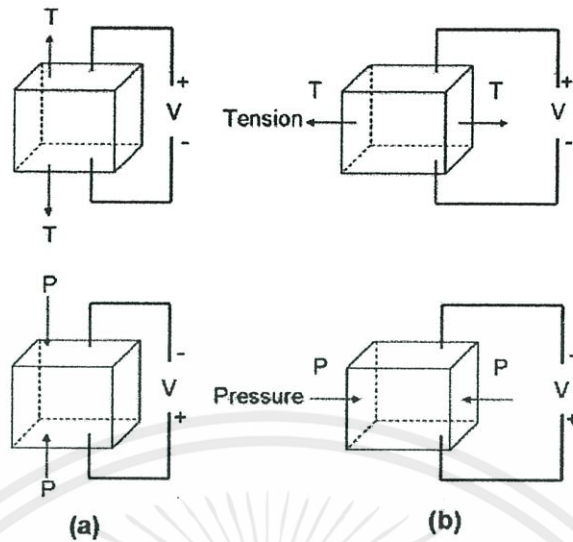
จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 การที่จะสร้างเครื่องมือที่กำเนิดพลังงานได้จากเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานจากการสั่นของสะพานนั้น จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีของ เพียโซอิเล็กทริก เพื่อที่จะนำไปออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน รวมถึงการเลือกใช้เครื่องมือวัดที่เหมาะสม ซึ่งในบทนี้ได้อธิบายทฤษฎีของเพียโซอิเล็กทริก การเลือกใช้และทฤษฎีของเครื่องมือวัด รวมถึงทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อสร้างเครื่องมือที่กำเนิดพลังงานได้จากเพียโซอิเล็กทริก

#### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก

เพียโซอิเล็กทริก คือ ความความสัมพันธ์ระหว่าง พหุคูณทางกลกับ พหุคูณทางไฟฟ้า ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกประเภทหนึ่ง ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ในผลึกถูกค้นพบ ในปี ค.ศ. 1880 โดยสองพี่น้อง J. Curie และ P. Curie เมื่อผลึกแต่ละชนิดตกอยู่ภายใต้ แรงดึง หรือ แรงอัด ซึ่งผลจากความเค้นจะทำให้เกิด โพลาริเซชันทางไฟฟ้า ในผลึก และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ในทางตรงกันข้าม เมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง เกิดแรงกลซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse piezoelectric effect)

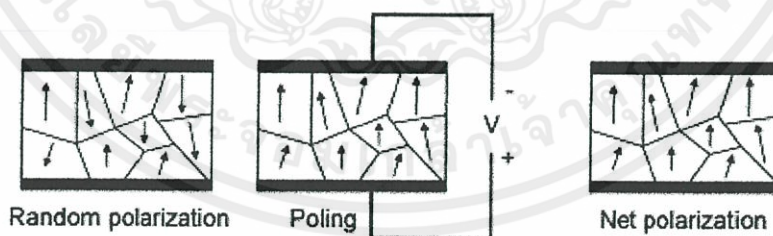
ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก นั้น ปรากฏการณ์ตามแนวขวาง ( $d_{31}$  mode) และปรากฏการณ์ตามแนวยาว ( $d_{33}$  mode) นั้นมีความสำคัญอย่างมาก โดยใน  $d_{33}$  mode นั้นทิศทางของแรงที่กระทำ กับทิศทางของประจุ เป็นทิศทางเดียวแต่ ในขณะที่ใน  $d_{31}$  mode แรงจะกระทำในแกนเดียว หรือทิศทางเดียว แต่ ประจุนั้นจะ ได้รับจากทิศทางที่ตั้งฉาก ดังในรูป 2.1 คือ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เมื่อ ใส่แรงดัน (P) หรือ แรงดึง (T) เข้าไปในผลึก และตัดแรงดันไฟฟ้าผ่านวัสดุ จากรูป 2.1 (a) แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนรูปร่างกับแรงดันไฟฟ้า (V) ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ  $d_{33}$  mode ส่วนในรูป 2.1 (b) นั้น การเปลี่ยนรูปร่างตั้งฉากกับแรงดันไฟฟ้า (V) นั่นคือ  $d_{31}$  mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เมื่อ ใส่แรงดัน (P) หรือ แรงดึง (T) เข้าไปในผลึก และตัดแรงดันไฟฟ้าผ่านวัสดุ จากรูป (a)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีโครงสร้างเป็นพหุผลึกซึ่งหมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างประกอบด้วย ผลึกหลายๆ ผลึกเรียงตัวในทิศทางต่างๆ กัน แต่ละผลึกมี โพลาริเซชันทางไฟฟ้า ที่มีขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยสามารถมองได้ว่า โพลาริเซชันทางไฟฟ้า เป็นลูกศรที่ปลายด้านหนึ่งเป็นไฟฟ้าขั้วลบ และปลายอีกข้างเป็น ขั้วไฟฟ้าบวก ดังในรูป 2.2 แต่ โพลาริเซชันทางไฟฟ้า ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก นั้นจำเป็นต้องมีทิศทาง หรือหัว ลูกศรหันไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อให้สามารถเกิด ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ ซึ่งสามารถทำได้โดย การใส่สนามไฟฟ้า ลงไปในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังในรูป 2.2 ที่แรงดันไฟฟ้าบางค่า จะทำให้ โพลาริเซชันทาง ไฟฟ้า หันไปในทิศทางเดียวกัน หลังจากนั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจึงจะสามารถเกิด ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้



รูปที่ 2.2 การทำให้โพลาริเซชันทางไฟฟ้า ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกหันไปในทิศทางเดียวกัน

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก สามารถเป็นได้ทั้ง เซ็นเซอร์ และตัวขับเคลื่อน ซึ่งในปัจจุบันนี้ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกใช้ใน เทคโนโลยี และงานวิจัยหลายๆ งานวิจัย

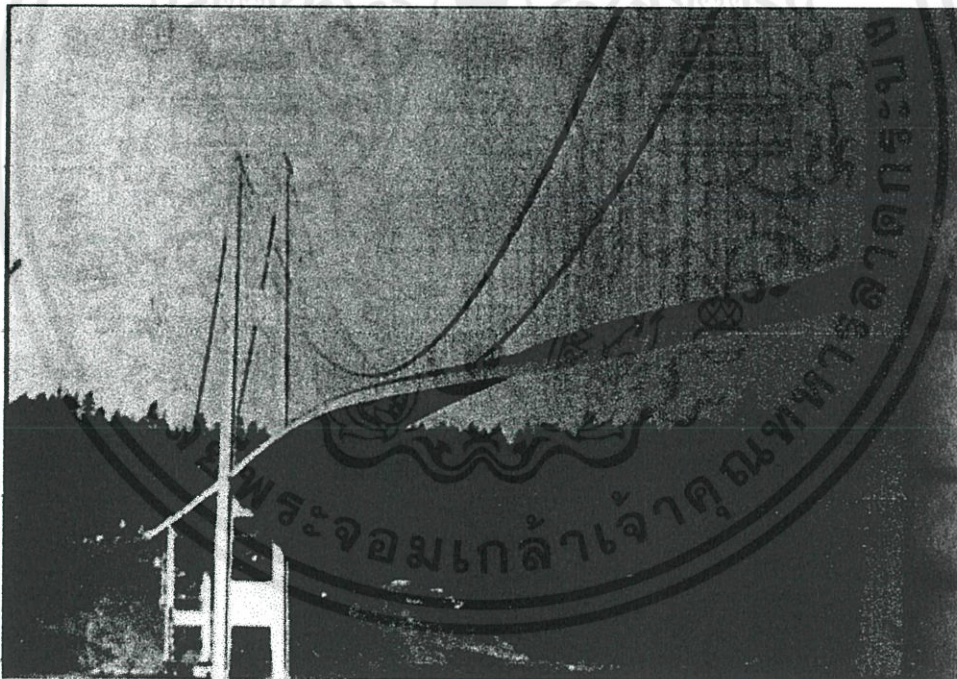
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการ ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความถี่เรโซแนนซ์

เมื่อได้ศึกษาทฤษฎีของเพียโซอิเล็กทริกแล้ว พบว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้น เมื่อตกอยู่ภายใต้ แรงดึง หรือ แรงอัด สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งในการสั่นของสะพานนั้น สามารถทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่น ทำให้เกิดความเค้นและเกิดสนามไฟฟ้า โดยถ้าความถี่ของสะพานมีความถี่ที่ตรงกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุด ทำให้เกิดพลังงานได้สูงสุด โดยการที่จะทำให้ สะพานและวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความถี่ตรงกันนั้น จึงต้องศึกษา ทฤษฎีของความถี่เรโซแนนซ์ โดยการศึกษ ทฤษฎีของความถี่เรโซแนนซ์นั้น จำเป็นต้องทราบความหมายของ ความถี่ธรรมชาติ

ความถี่ธรรมชาติ คือ ความถี่ของการสั่นของวัตถุ ซึ่งเกิดขึ้นจากการรบกวนวัตถุนั้น หรือการให้พลังงานกับวัตถุนั้น ซึ่งพลังงานที่ให้แก่วัตถุจะทำให้วัตถุเกิดการสั่นเราเรียกว่าความถี่ธรรมชาติโดยขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของวัตถุนั้น ๆ

เรโซแนนซ์ คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใส่พลังงานให้กับวัตถุ จะทำให้วัตถุสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ถ้าความถี่ของพลังงานที่ให้แก่วัตถุมีความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่นตามธรรมชาติของวัตถุนั้น เป็นผลทำให้วัตถุนั้นรับพลังงานเข้าไปได้ดีที่สุดจึงทำให้วัตถุนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดที่มากขึ้น การสั่นจะรุนแรงมากขึ้นโดยได้ศึกษกรณีตัวอย่างการสั่นของสะพาน ซึ่งมีผลมาจากความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.3 สะพานทาโคมาแนโรว์ อเมริกา [4]

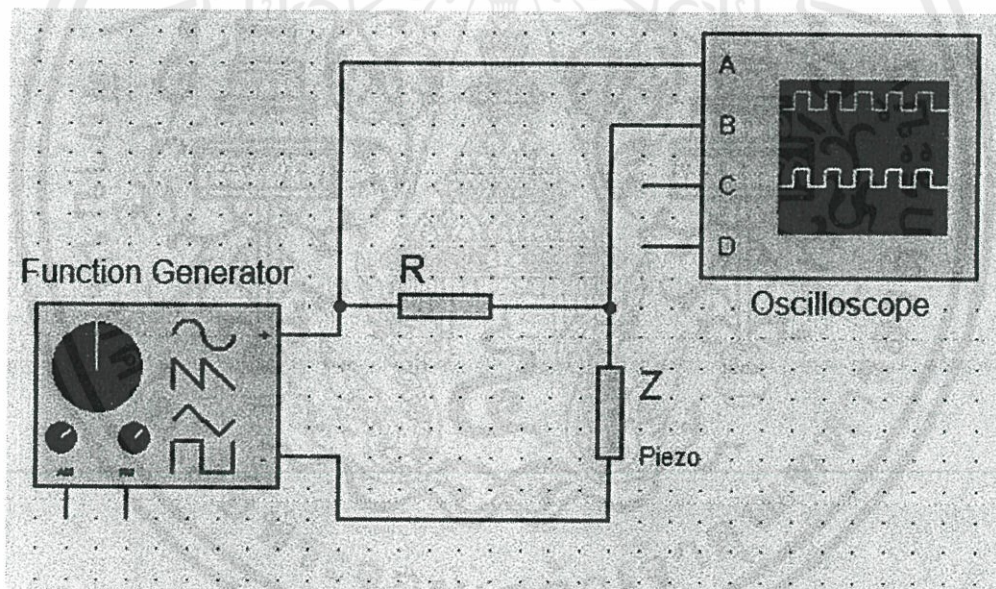
วันที่ 1 พฤศจิกายน ค.ศ. 1940 สะพานแขวนแพลตในรัฐวอชิงตัน สหรัฐอเมริกาชื่อ สะพานทาโคมาแนโรว์ ได้พังถล่มลงมา เพียงเพราะการกระทำของกระแสลมธรรมดา ซึ่งเกิดจากความถี่ธรรมชาติของลม และความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้น มีความถี่ค่าเดียวกัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ความถี่เรโซแนนซ์ขึ้น ซึ่งสะพานเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุด จนเกิดการพังลงมา

## 2.3 การหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์

การที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะให้พลังงานสูงสุดนั้น จำเป็นต้องปรับค่าความถี่ให้ตรงกับความถี่ของสะพาน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยป้อนความถี่เข้าไปในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยเปลี่ยนค่าไปจนพบความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยทำการทดลองจาก ทฤษฎีการหาค่าอิมพีแดนซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเชิงซ้อนและกระแสเชิงซ้อน ซึ่งอยู่ในโดเมนความถี่ โดยจะได้ว่า

$$Z = \frac{V}{I}$$

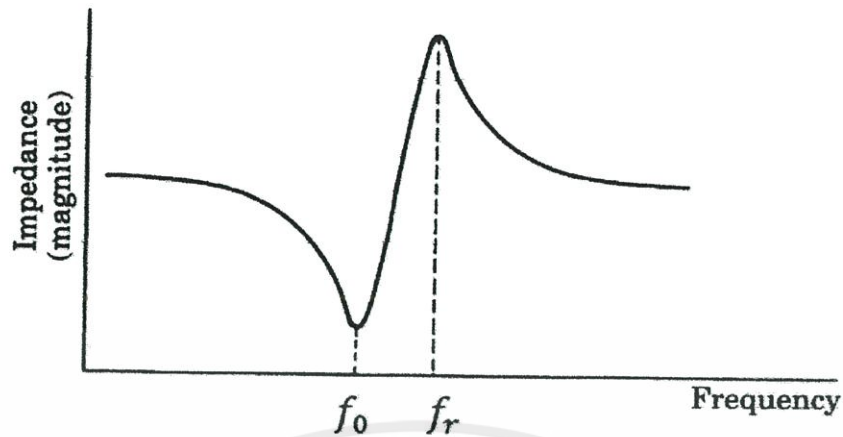
Z เรียกว่า “อิมพีแดนซ์ (Impedance)” ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันเฟสเซอร์ต่อกระแสเฟสเซอร์ อิมพีแดนซ์เหล่านี้มีหน่วยเป็นโอห์มในทุกกรณี การหาค่าอิมพีแดนซ์นั้นต้องใช้วงจรดังรูป 2.4 สำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ของ Piezoelectric



รูปที่ 2.4 วงจรสำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ของ Piezoelectric

เมื่อเราทำการต่อวงจรสมมูลพื้นฐานดังรูปที่ 2.4 แล้ว Plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่จะได้กราฟดังรูป 2.5 โดยที่กำหนดให้  $f_0$  คือ Resonance frequency และ  $f_r$  คือ Anti-resonance frequency ซึ่งจุดที่ความถี่ ณ ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดจะเรียกว่า Resonance frequency และจุดที่ความถี่ ณ ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดจะเรียกว่า Anti-resonance frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



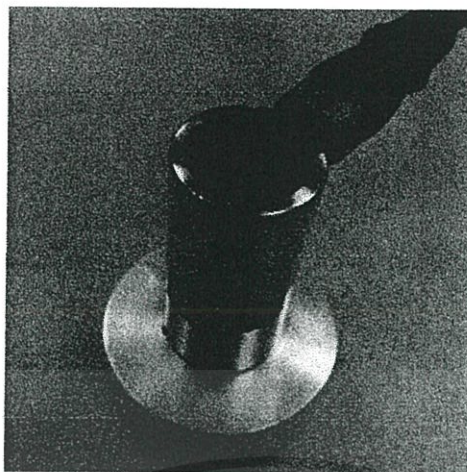
รูปที่ 2.5 กราฟแสดง Resonance frequency และ Anti-resonance frequency

เมื่อได้ศึกษาทฤษฎีในบทนี้แล้วจึงนำทฤษฎีที่ได้ศึกษามาเพื่อทำการทดลอง และออกแบบอุปกรณ์กำเนิดพลังงานจาก วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ในบทต่อไป

## 2.4 เครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer)

เครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุ โครงสร้างของเครื่องมือวัดความเร่งจะประกอบด้วยสปริง และลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่อีกครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง โดยเครื่องมือวัดความเร่ง ดังรูป 2.6 นั้นเป็นเครื่องมือวัดชนิดพกพาของบริษัท ERBESSD Instrument ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์พกพาผ่านพอร์ตการเชื่อมต่อ USB 2.0 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

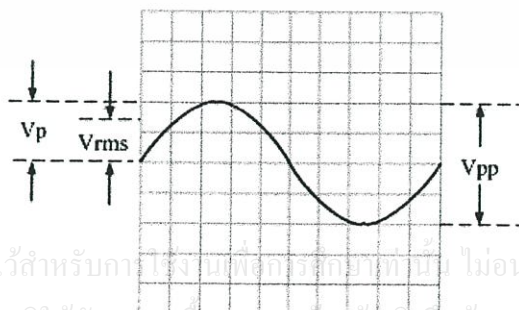


รูปที่ 2.6 เครื่องมือวัดความแรง

จากทฤษฎีการหาความถี่เรโซแนนซ์ในหัวข้อ 2.3 นั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดความแรงเพื่อทำการวัดและวิเคราะห์ความถี่ของถนน และทำการหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน เพื่อที่จะปรับให้ความถี่ของถนน และความถี่ของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานให้ตรงกัน ซึ่งเรานำทฤษฎีในบทนี้ไปใช้เพื่อการออกแบบ และทดลองในบทต่อไป

## 2.5 เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope)

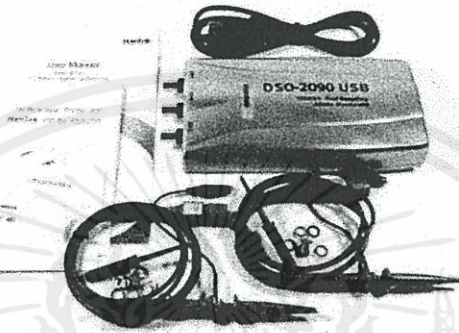
เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า (Oscilloscope) เครื่องมือวัดที่มีส่วนสำคัญในการทำงาน และถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ออสซิลโลสโคป คือเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเป็นอัตราส่วนเวลาการอ่านค่าปริมาณไฟฟ้าที่แสดงบนจอออสซิลโลสโคป ถ้าเป็นการอ่านแอมพลิจูดของปริมาณไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้าจะอ่านออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าพีค ( $V_p$ ) หรืออ่านออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าพีคทูพีค ( $V_{p-p}$ ) ดังรูป 2.7 ถ้าเป็นการอ่านความถี่ (Frequency) ของปริมาณไฟฟ้า จะต้องอ่านออกมาโดยเทียบกับเวลาเป็นวินาที



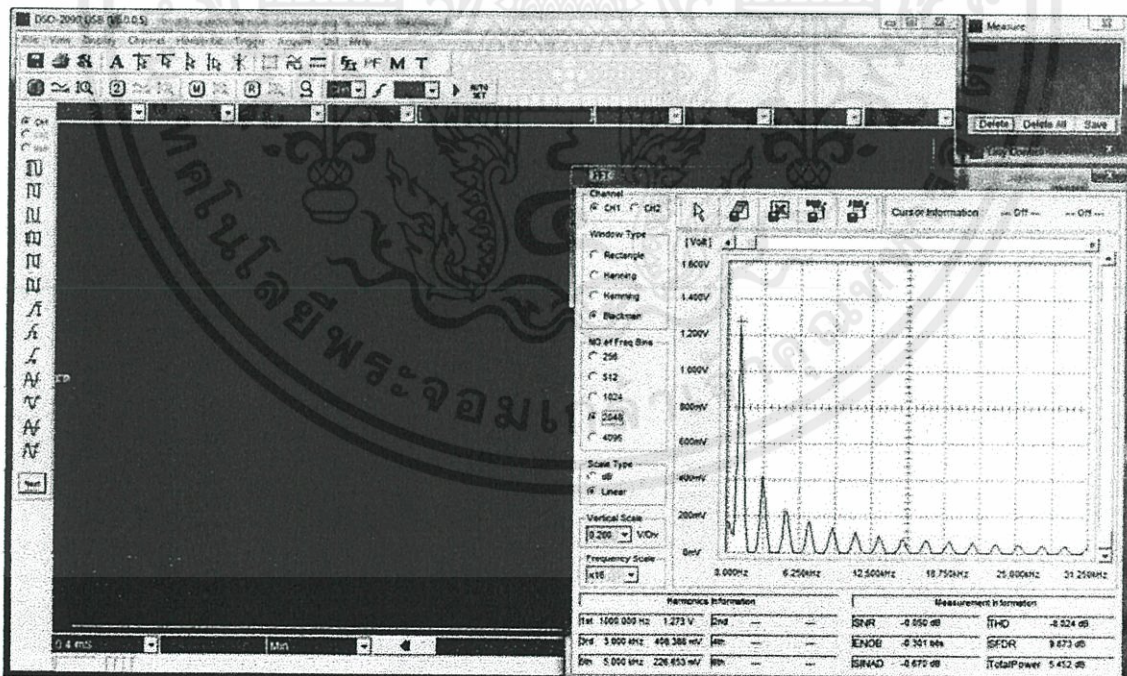
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 สัญญาณจากการวัดแรงดันไฟฟ้า [4]

โดยออสซิลโลสโคปที่ใช้จำเป็นต้องเป็นออสซิลโลสโคปแบบพกพา หรือออสซิลโลสโคปที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พกพาได้ เพราะในการวัดพลังงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น จำเป็นต้องนำออสซิลโลสโคปขึ้นไปวัดค่าพลังงาน ณ จุดที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน นั้นคือต้องสามารถนำออสซิลโลสโคปไปวัดค่าพลังงานบนสะพานได้ เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ออสซิลโลสโคปของบริษัท Hantek รุ่น DSO-2090 ดังรูป 2.8 ซึ่งมีราคาไม่สูงมาก และยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พกพาผ่านพอร์ตการเชื่อมต่อ USB 2.0 ได้ ทำให้สามารถนำขึ้นไปบนสะพานได้



(ก) ออสซิลโลสโคปของบริษัท Hantek รุ่น DSO-2090



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ข) Software DSO-2090 USB ซึ่งใช้คู่กับออสซิลโลสโคปของบริษัท Hantek รุ่น DSO-2090 ไปใช้รูปที่ 2.8 เครื่องแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า [1]

ออสซิลโลสโคปนั้นสามารถนำไปใช้วัดแรงดันไฟฟ้า , มุมต่างเฟส, ความถี่ และเวลาของสัญญาณรูปคลื่น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ของวงจรไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์อย่างยิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

จากที่เราได้ศึกษาทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 จึงนำทฤษฎีเพื่อมาใช้ทำการออกแบบและทดลองโดยที่ได้เลือกสถานที่ในการทดลองเลือกวัดข้อมูลการสั่นที่สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซึ่งพบว่าโครงสร้างของสะพานนั้นสามารถเคลื่อนไหวได้เมื่อมีแรงมากระทำ เนื่องจากสะพานนั้นเป็นโครงสร้างที่มีการยึดปลายทั้งสองด้านไว้ และปล่อยให้โครงสร้างตรงกลางเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ดังนั้นบริเวณกลางสะพานจึงเป็นบริเวณที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยการวัดการสั่นสะเทือนทำเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

#### 3.1 การวัดการสั่นสะเทือนของสะพาน

เริ่มการตรวจสอบโดยการนำอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) ของบริษัท ERBESSD Instrument ไปทำการวัดตามตำแหน่งต่างๆ ของสะพานเพื่อตรวจสอบหาบริเวณของสะพานที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยวัดที่บริเวณราวสะพานทั้งแนวตั้งและแนวนอน และวัดที่บริเวณพื้นถนนบนสะพาน ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นจึงทำการวัดความถี่ในกรณี ที่ไม่มีรถวิ่ง และเมื่อมีรถวิ่ง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความถี่และแอมพลิจูดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน

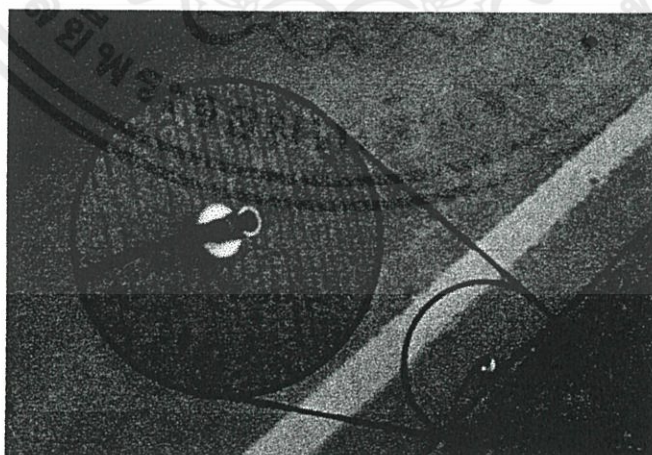
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การวัดการสั่นสะเทือนที่ราวสะพาน (แนวตั้ง)



(ข) การวัดการสั่นสะเทือนที่ราวสะพาน (แนวนอน)

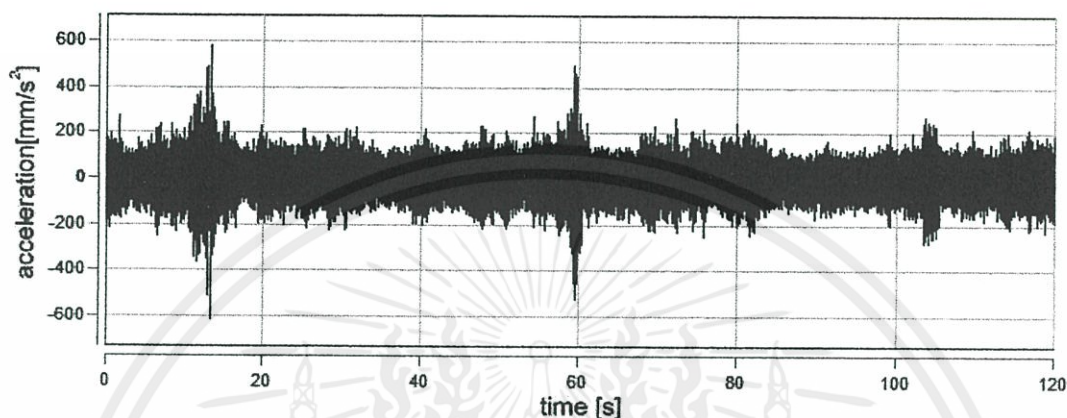


(ค) การวัดการสั่นสะเทือนบนถนนที่สะพาน

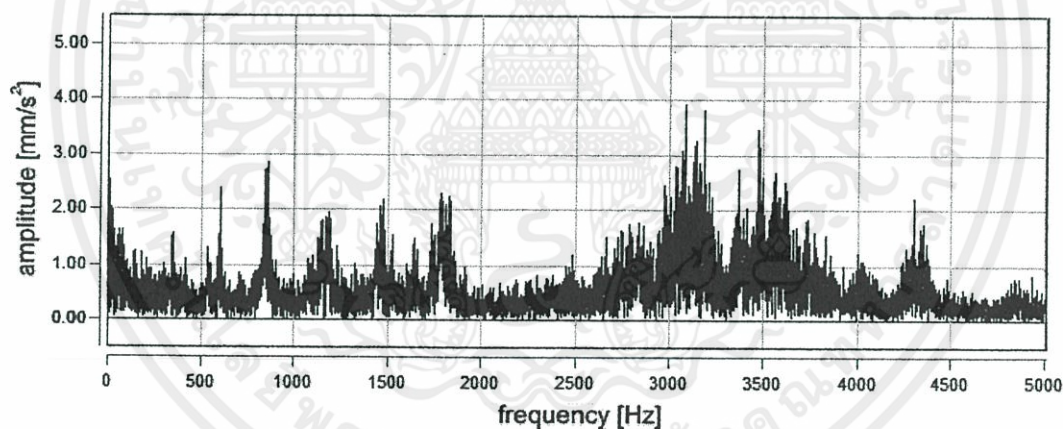
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่วัดการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาของหน่วยงานต้นสังกัด หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่หรือแจกจ่ายเอกสารนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด

หลังจากวัดการสั่นสะเทือนของสะพานในกรณีต่างๆ แล้ว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นความเร่งของการสั่นของสะพาน เราจะนำข้อมูลนี้มาวิเคราะห์ โดยการทำ Fast Fourier Transform ดังรูปที่ 3.3 แล้วหาค่าเฉลี่ยและแยกแยะความถี่ของรถยนต์แต่ละชนิดโดยการนำกราฟที่ได้จากการทำ Fast Fourier Transform มาเทียบกับภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกไว้ เพื่อหาความถี่ของสะพานที่มีแอมพลิจูดสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งก็คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน



(ก) กราฟความเร่งของการสั่นสะเทือนเทียบกับเวลา บริเวณราวสะพาน (แนวนอน)



(ข) กราฟแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนเทียบกับความถี่ บริเวณราวสะพาน (แนวนอน)

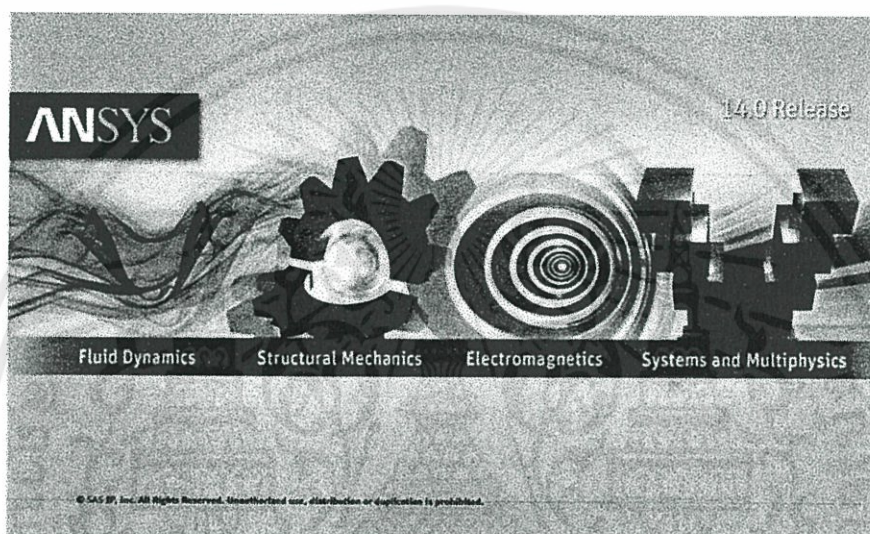
รูปที่ 3.3 กราฟก่อน และหลังแปลง Fast Fourier Transform

จากนั้นจึงนำความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานที่วัดได้ไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับสะพาน เพื่อให้ขณะที่สะพานสั่นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเกิดการสั่นไปพร้อมกับสะพาน และเกิดการกำจัดสูงสุด ทำให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดความเค้นสูงสุดและจึงให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

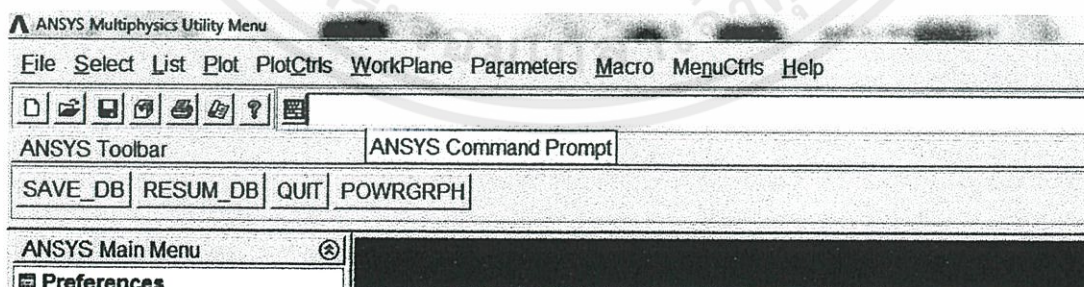
### 3.2 การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน จึงนำความถี่เรโซแนนซ์ไปออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้มีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน เพื่อให้ขณะที่สะพานสั่นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเกิดการสั่นไปพร้อมกับสะพาน และเกิดการกำจัดสูงสุด ทำให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดความเค้นสูงสุด และจึงให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าสูงสุด โดยทำการเลือกวัสดุเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 ดังรูป 3.4 เพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน



รูปที่ 3.4 โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0

ในส่วนการใช้งานโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 นั้นสามารถทำได้โดยการ ป้อนคำสั่งการใช้งานต่างๆ เข้าไปในช่อง ANSYS Command Prompt ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งในส่วนของคำสั่งการใช้งานนั้นจะกล่าวในช่วงต่อไป



รูปที่ 3.5 ช่อง ANSYS Command Prompt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การเลือกวัสดุ

วัสดุที่จะนำมาใช้ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น จะต้องหาซื้อไปทั่วๆ และมีข้อมูลจำพวก ความหนาแน่น (Density), Poisson's ratio และ Young's modulus ที่แน่นอน เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้ จำเป็นต่อการออกแบบ และการหาความถี่ของ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

### 3.2.2 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากที่ได้ข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน จะสามารถใช้ข้อมูลคุณสมบัติ ของวัสดุที่หามาได้เพื่อจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 โดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้

/PREP7

!เปิดใช้กลุ่มคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลอง

#### 3.2.2.1 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกันเพราะฉะนั้น จึงจำเป็นต้องทราบข้อมูลเหล่านั้นก่อน จึงจะสามารถนำวัสดุชนิดนั้นๆ มาออกแบบโครงสร้างได้ โดยจะใช้คำสั่งดังต่อไปนี้ในการกำหนดค่าคุณสมบัติ ของวัสดุ

ET, 1, SOLID95

!เลือกชนิดของวัสดุ

MP, DENS, 1, ความหนาแน่น

!กำหนดค่าความหนาแน่นของวัสดุ

MP, NUXY, 1, Poisson's ratio

!กำหนดค่า Poisson's ratio ของวัสดุ

MP, EX, 1, Young's modulus

!กำหนดค่า Young's modulus ของวัสดุ

#### 3.2.2.2 การสร้างโครงสร้างต่างๆ

ในโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 นั้นสามารถสร้างโครงสร้างได้หลายรูปแบบโดยการ กำหนดขนาดนั้นมีหน่วยเป็นเมตร และมีตัวอย่างคำสั่งที่ใช้สร้างโครงสร้างต่างๆ ดังต่อไปนี้

BLC4, x, y, กว้าง, สูง, ยาว

!สร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมโดยการกำหนดมุม

BLC5, x, y, กว้าง, สูง, ยาว

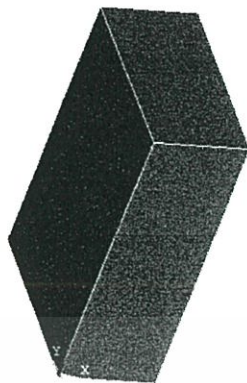
!สร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมโดยการกำหนดจุดกึ่งกลาง

BLOCK, x1, x2, y1, y2, z1, z2

!สร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมโดยกำหนดช่วงบนแกน x, y และ z

คำสั่งข้างต้นเป็นคำสั่งพื้นฐานในการสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมซึ่งในรูปที่ 3.6 นั้นเป็นตัวอย่างการใช้คำสั่ง BLC4, BLC5 และ BLOCK สั่งเกตุค่าต่างๆ ที่แทนค่าลงไป ในคำสั่งจะพบว่าคำสั่งทั้ง 3 นั้นใช้แตกต่างกัน

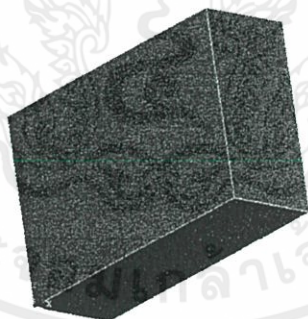
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ใช้คำสั่ง BLC4, 0, 0, 1, 2, 3



(ข) ใช้คำสั่ง BLC5, 0, 0, 1, 2, 3



(ง) ใช้คำสั่ง BLOCK, 0, 1, 0, 2, 0, 3

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการใช้คำสั่งสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมในโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0

หลังจากที่ได้ทราบวิธีการสร้างคำสั่งพื้นฐานในการสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยม BLC4, BLC5 และ BLOCK แล้ว ต่อไปจะเป็นคำสั่งพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างปริมาตรทรงกระบอกโดยที่กำหนดตัวแปรดังต่อไปนี้ กำหนดให้ r1 = รัศมีวงใน, r2 = รัศมีวงนอก, Tt1 = องศาของปริมาตรทรงกระบอกที่จะเริ่มสร้าง และ Tt2 = องศาของปริมาตรทรงกระบอกที่จะสิ้นสุดการสร้าง

CYL4, x, y, r1, Tt1, r2, Tt2, หนา

!สร้างปริมาตรทรงกระบอกโดยการกำหนดจุดกึ่งกลาง

CYL5, x1, y1, x2, y2, หนา

!สร้างปริมาตรทรงกระบอกโดยการกำหนดขอบ

CYLIND, r1, r2, z1, z2, Tt1, Tt2

!สร้างปริมาตรทรงกระบอกโดยจุดกึ่งกลางอยู่ที่จุดออริจินส์

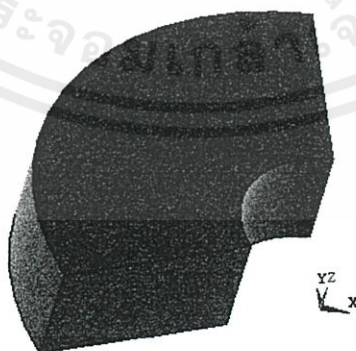
คำสั่งข้างต้นเป็นคำสั่งพื้นฐานในการสร้างปริมาตรทรงกระบอกซึ่งในรูปที่ 3.7 นั้นเป็นตัวอย่างการใช้คำสั่ง CYL4, CYL5 และ CYLIND สังเกตค่าต่างๆ ที่แทนค่าลงไปในการคำสั่งจะพบว่าคำสั่งทั้ง 3 นั้นใช้แตกต่างกัน



(ก) ใช้คำสั่ง CYL4, 2, 2, 1, 30, 2, 270, 1



(ข) ใช้คำสั่ง CYL5, 0, 0, 1, 1, 1



(ค) ใช้คำสั่ง CYLIND, 1, 3, 0, 1, 90, 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงในสื่อต่างๆ ซึ่งสงวนลิขสิทธิ์ไว้  
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการใช้คำสั่งสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยมในโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0

หลังจากที่ได้ทราบคำสั่งพื้นฐานในการสร้างโครงสร้างปริมาตรสี่เหลี่ยม และปริมาตรทรงกระบอกแล้ว แต่หากโครงสร้างที่ต้องการออกแบบนั้นไม่เป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยม หรือทรงกระบอก โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 ก็สามารถสร้างโครงสร้างที่มีปริมาตรจากการสร้างพื้นที่ขึ้นมาแล้วนำพื้นที่นั้นมาเพิ่มความหนาให้กลายเป็นปริมาตรได้โดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้โดย กำหนดให้  $n$  = ลำดับของโครงสร้างที่สร้าง

VOFFST,  $n$ , ความหนา

!เลือกพื้นที่จากลำดับที่สร้างแล้วทำให้เป็นปริมาตร

หลังจากที่ทราบคำสั่งที่สามารถสร้างปริมาตรจากพื้นที่แล้ว จึงควรทราบคำสั่งในการสร้างพื้นที่ต่างๆ โดยคำสั่งที่ใช้ในการสร้างพื้นที่ขึ้นพื้นฐานดังต่อไปนี้

RPOLY, จำนวนด้าน, ความยาว

!สร้างพื้นที่เหลี่ยมด้านเท่าโดยจุดกึ่งกลางอยู่ที่จุดออริจินส์

RPR4, จำนวนด้าน,  $x$ ,  $y$ , รัศมี

!สร้างพื้นที่เหลี่ยมด้านเท่าโดยกำหนดจุดกึ่งกลาง

PTXY,  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $x_2$ ,  $y_2$ ,  $x_3$ ,  $y_3$ ,  $x_4$ ,  $y_4$

!สร้างพื้นที่เหลี่ยมด้านไม่เท่าโดยการกำหนดจุดต่างๆ

POLY

!คำสั่งที่ใช้คู่กับ PTXY

หลังจากที่ทราบคำสั่งที่ใช้ในการสร้างพื้นที่แล้ว จึงสามารถสร้างปริมาตรจากพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมได้ดังรูป 3.8 โดยใช้คำสั่งสร้างพื้นที่ข้างต้น กับคำสั่งสร้างปริมาตรจากพื้นที่ใดๆ



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการใช้คำสั่งสร้างปริมาตรจากพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมโดยใช้คำสั่ง RPR4, 5, 0, 0, 1 -> RPOLY, 5, 1 -> VOFFST, 2, 2 -> VOFFST, 1, 1

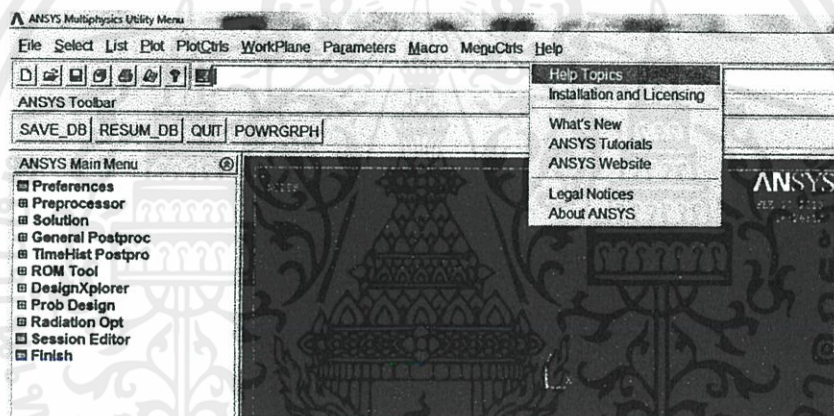
จากรูปที่ 3.8 เป็นการสร้างโครงสร้าง 2 โครงสร้างขึ้นมาโดยที่ทั้ง 2 โครงสร้างนั้นไม่ได้เชื่อมติดกัน หรือคิดปริมาตรแยกกัน แต่หากต้องการสร้างโครงสร้างที่เป็นปริมาตรหลายๆ โครงสร้างแล้วต้องการนำโครงสร้างเหล่านั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน จึงจำเป็นต้องใช้คำสั่งดังต่อไปนี้ เพื่อเชื่อมปริมาตรเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

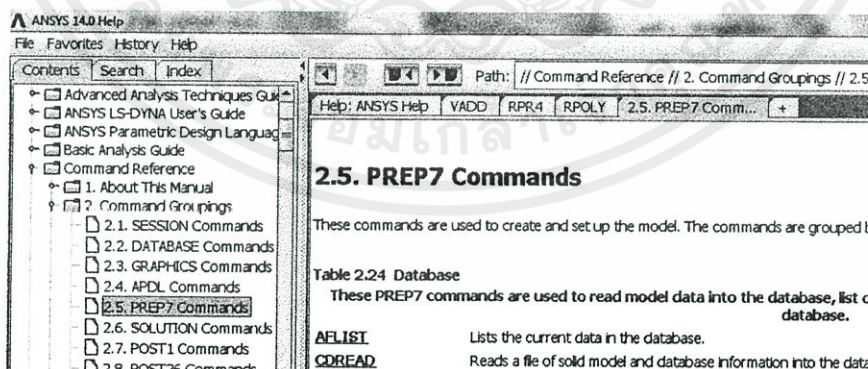
VGLUE, all  
 VGLUE, 1, 2, 3, ..., n  
 VADD, all  
 VADD, 1, 2, 3, ..., n  
 AGLUE, all  
 AGLUE, 1, 2, 3, ..., n  
 AADD, all  
 AADD, 1, 2, 3, ..., n

!เพื่อเชื่อมปริมาตรทั้งหมดเข้าด้วยกัน  
 !เลือกปริมาตรที่ต้องการจากลำดับการสร้างแล้วเชื่อม  
 รวมปริมาตรทั้งหมดเป็นปริมาตรเดียว  
 รวมปริมาตรที่ต้องการเพื่อให้เหลือปริมาตรเดียว  
 !เพื่อเชื่อมพื้นที่ทั้งหมดเข้าด้วยกัน  
 !เลือกพื้นที่ที่ต้องการจากลำดับการสร้างแล้วเชื่อม  
 รวมพื้นที่ทั้งหมดเป็นพื้นที่เดียว  
 รวมพื้นที่ที่ต้องการเพื่อให้เหลือพื้นที่เดียว

โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 นั้นยังมีคำสั่งอีกมากมายที่สามารถนำมาใช้สร้าง  
 โครงสร้างได้ โดยสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Help Topics -> PREP7 Command ดังรูปที่ 3.9 หลังจาก  
 ได้โครงสร้างที่ต้องการแล้วต่อไปจึงนำโครงสร้างเหล่านั้นไปแบ่งเป็นหน่วยเล็กๆ เพื่อสร้างโหนดให้สามารถใส่  
 แรง หรือใส่การก้ำจัดได้ เพื่อให้สามารถดูค่าคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้างที่เราออกแบบได้นั่นเอง



(ก) การเข้าถึง Help Topics



(ข) การเข้าถึง PREP7 Command

รูปที่ 3.9 การค้นหาคำสั่งในการสร้างโครงสร้างต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เป็นเอกสารที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.3 การแบ่งโครงสร้างเป็นหน่วยเล็กๆ

นอกจากการกำหนดคุณสมบัติ และขนาดของโครงสร้างแล้ว ยังคงจำเป็นต้องใช้คำสั่งต่อไปนี้ไปใช้ในการแบ่งโครงสร้างเป็นหน่วยเล็กๆ ดังรูป 3.10 เพื่อที่จะทำให้โครงสร้างสามารถแสดงผลการกำจัด และความเค้นของโครงสร้างได้

ESIZE, ขนาดของหน่วยเล็กๆ

!กำหนดขนาดของหน่วยเล็กๆ ของโครงสร้าง

VSEL, s, loc, z, z1, z2

!กำหนดช่วงที่ต้องการจะแบ่งโครงสร้าง

TYPE, 1

MAT, 1

Mshape, 1, 3D

VMESH, all

Finish



รูปที่ 3.10 การแบ่งโครงสร้างเป็นหน่วยเล็กๆ

ก่อนที่จะสามารถหา ค่าความถี่, ค่าการกำจัดสูงสุด และค่าความเค้นของโครงสร้างที่ออกแบบได้นั้น จำเป็นต้องใช้คำสั่งข้างต้นเป็นคำสั่งพื้นฐานเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองในรูปแบบต่างๆ แล้วจึงจะใช้คำสั่งที่จะกล่าวดังต่อไปนี้เพื่อหา ค่าความถี่, ค่าการกำจัดสูงสุด และค่าความเค้นของโครงสร้างที่ออกแบบ

### 3.2.3 การหาค่าความถี่ของโครงสร้าง

จากการที่ได้ออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแล้ว จึงจำเป็นต้องหาค่าความถี่ของโครงสร้างที่ออกแบบเพื่อปรับขนาดของโครงสร้างเพื่อให้ค่าความถี่มีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานที่ได้หาไว้ในข้างต้น สามารถหาค่าความถี่ของโครงสร้างที่ออกแบบมาได้โดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้ ใส่เข้าไปในโปรแกรมหลังจากที่สร้างแบบจำลองแล้ว

/SOLU  
 ANTYPE, modal  
 MODOPT, LANB, 5  
 MXPAND, 5

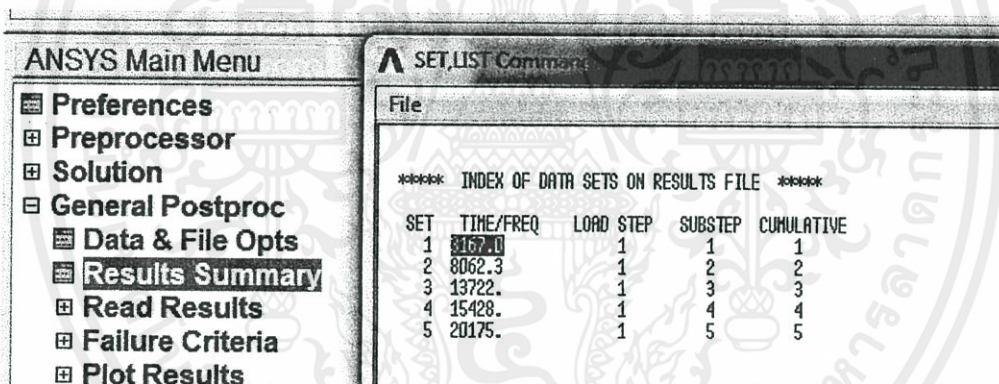
!เปิดใช้คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับ Solution processor  
 !Modal analysis

nsel, s, loc, แกน, ตำแหน่ง  
 d, all, ux,,,,, uy, uz

!เลือกโหนดที่ต้องการจะยึด  
 !ยึดทั้งแถว

nsel, all  
 Solve  
 Finish

หลังจากที่ทราบค่าความถี่ของโครงสร้างที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 3.11 แล้ว แต่ค่าความถี่ที่ได้อาจจะยังไม่ตรงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานจึงจำเป็นต้องทดลองเปลี่ยนขนาดของโครงสร้าง จนกว่าจะได้ค่าความถี่ที่ตรงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน จากนั้นจึงนำค่าความถี่ที่หามาได้นั้นไปหาค่าการก้ำจัดสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ ความถี่นั้น และนำไปหาความเค้นต่อไป



รูปที่ 3.11 ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างที่ออกแบบ

### 3.2.4 การหาค่าการก้ำจัดสูงสุดของโครงสร้าง ณ ความถี่ใดๆ

เมื่อออกแบบโครงสร้างของ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้อยู่ในย่านความถี่ที่ต้องการได้แล้ว จากนั้นจึงนำทั้งขนาด และความถี่ ของโครงสร้างนั้น มาทำการหาค่าการก้ำจัดสูงสุด ณ ความถี่นั้นๆ โดยการใส่แรงเข้าไปในจุดที่คาดว่าจะเกิด การก้ำจัดสูงสุด โดยใช้คำสั่งดังต่อไปนี้ไปใส่แทน คำสั่งในหัวข้อ 3.2.3

/SOLU  
 ANTYPE, HARM  
 HARFRQ, freq1, freq2  
 NSUBST, จำนวนสแต็ป  
 KBC, 1

!เปิดใช้คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับ Solution Processor  
 !Harmonic analysis

!ช่วงความถี่ที่ต้องการ

!จำนวนสแต็ปที่ต้องการสุ่ม

เอกรังสีที่ส่งมาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อตรวจสอบการไหลของน้ำในอนุภาคให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา!จำนวนสแต็ปที่ต้องการสุ่มเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nset, s, loc, x, ตำแหน่ง  
 nset, r, loc, y, ตำแหน่ง  
 nsel, r, loc, z, ตำแหน่ง  
 f, all, fz, ขนาดของแรง

!เลือกโหนดที่ต้องการจะใส่แรง แกน x  
 !เลือกโหนดที่ต้องการจะใส่แรง แกน y  
 !เลือกโหนดที่ต้องการจะใส่แรง แกน z  
 !ใส่แรงลงไปที่โหนดที่เลือกไว้

nset, s, loc, แกน, ตำแหน่ง  
 d, all, ux,,,,, uy, uz

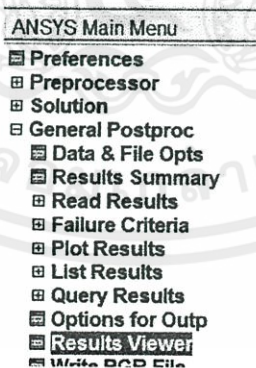
!เลือกโหนดที่ต้องการจะยึด  
 !ยึดทั้งแถว

nset, all  
 Solve  
 Finish

หากเลือกขนาดของหน่วยเล็กๆ ในโครงสร้างให้มีโหนดตรงกับโหนดที่เลือกที่จะใส่แรงที่ใส่ลงไป  
 ในโครงสร้าง สังเกตจากที่โครงสร้างจะมีลูกศรแสดงแรงอยู่บนโครงสร้างดังรูป 3.12 (ก) จากนั้นจึงทำการหาค่า  
 การกำจัดดังรูป 3.12 ณ จุดที่ใส่แรง หรือคือจุดที่คาดว่าจะมีการเคลื่อนไหวมากที่สุดนั่นเอง

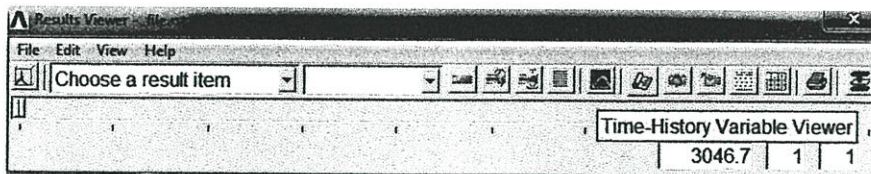


(ก) ลูกศรสีแดงแสดงการใส่แรงบนโครงสร้าง

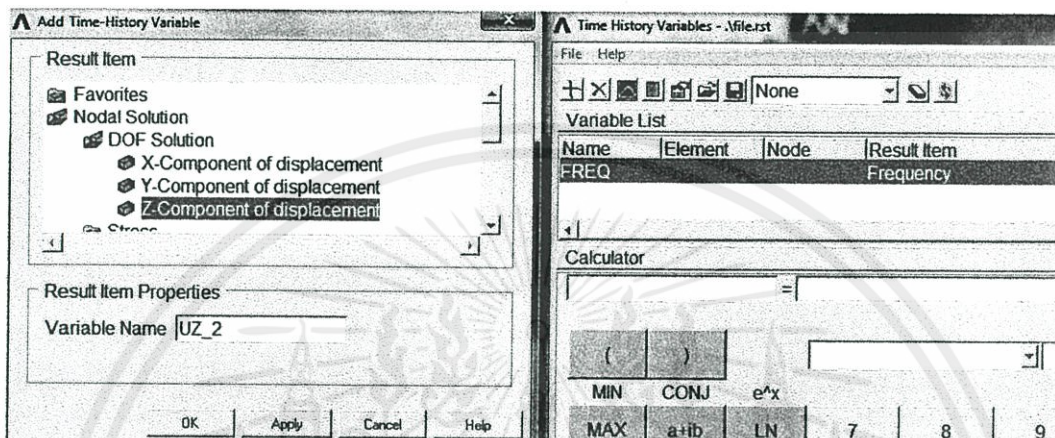


(ข) เข้า ANSYS Main Menu -> General Postproc -> Results Viewer

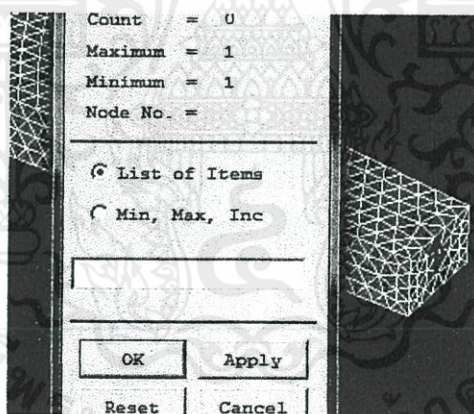
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) จากนั้นเลือก Time-History Variable Viewer



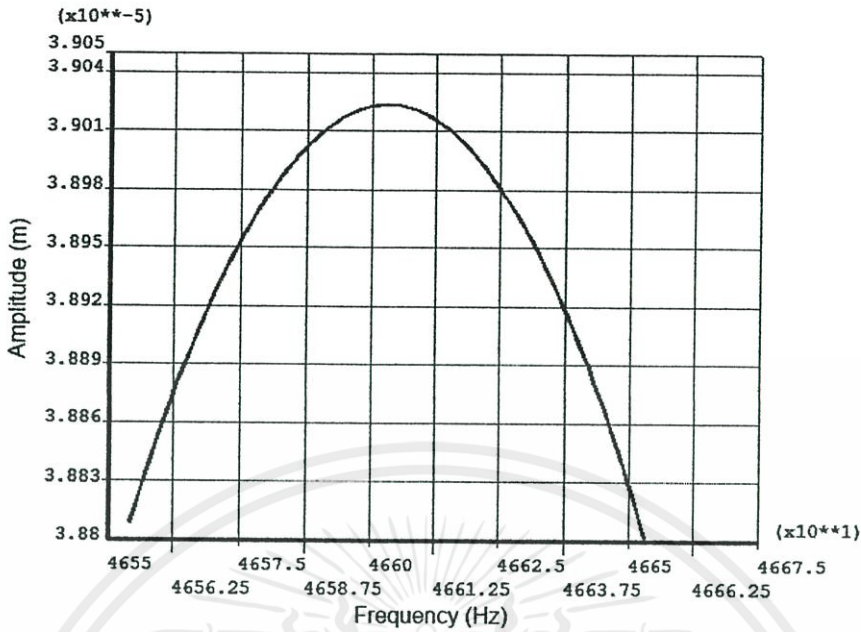
(ง) แล้วเลือก Add list -> Z-Component of displacement



(จ) จากนั้นเลือกโหนดบริเวณที่ใส่แรงเข้าไปเพื่อหาค่าการก้ำจัดสูงสุด  
รูปที่ 3.12 การหาค่าการก้ำจัดที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์

หลังจากที่ทำตามขั้นตอนแล้วจะได้กราฟแสดงการก้ำจัด ณ ช่วงเวลาที่เลือกไว้ดังรูปที่ 3.13 ทำให้ทราบค่าการก้ำจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ได้ออบแบบ เมื่อพิจารณากราฟตัวอย่างจะพบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างนั้นจะมีการก้ำจัดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างกราฟแสดงการกำจัด ณ ช่วงความถี่ที่เลือก

หลังจากที่ทราบค่าการกำจัดสูงสุดแล้ว จึงนำค่าการกำจัดสูงสุดที่ได้ไปใส่ลงบนโครงสร้างแบบจำลอง เพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างแบบจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ออกแบบต่อไป

### 3.2.5 การหาค่าความเค้นของโครงสร้างใดๆ

หลังจากที่ทราบการกำจัดของโครงสร้างแบบจำลองไปแล้ว จากนั้นจึงสามารถนำการกำจัดนั้นมาใส่บนโครงสร้างเพื่อนำไปหาค่าความเค้นของโครงสร้างแบบจำลองต่อไป โดยการใส่การกำจัดบนโครงสร้างนั้น จำเป็นต้องเลือกขนาดของหน่วยเล็กๆ ในโครงสร้างให้มีขอบตรงกัขอบที่เลือกที่จะใส่การกำจัดที่ใส่ลงไปในโครงสร้าง สังเกตจากที่โครงสร้างจะมีลูกศรแสดงการกำจัดอยู่บนโครงสร้างดังรูป 3.14 จากนั้นจึงนำโครงสร้างแบบจำลองนี้ไปหาค่าความเค้นต่อไป



รูปที่ 3.14 ลูกศรแสดงการใส่การกำจัดบนโครงสร้าง

โดยที่คำสั่งต่อไปนี้ เป็นคำสั่งที่ใช้ในการในการหาค่าความเค้นของโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ออกแบบไว้ในข้างต้น หลังจากที่ได้ป้อนคำสั่งการหาค่าความเค้นเข้าไปในโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 แล้วจะต้องพบลูกศรแสดงการกำจัดดังรูปที่ 3.14 หากไม่พบลูกศรแสดงการกำจัด ก็จำเป็นต้องทดลองเปลี่ยนขนาดของหน่วยเล็กๆ ของวัสดุในหัวข้อ 3.2.2.3 เพื่อให้สามารถใส่การกำจัดลงบนโครงสร้างได้

/SOLU

nset, s, loc, x, ตำแหน่ง

nset, r, loc, y, ตำแหน่ง

nset, r, loc, z, ตำแหน่ง

d, all, uz, ขนาดของการกำจัด

!เปิดใช้คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับ Solution Processor

!เลือกโหนดที่ต้องการจะใส่แรง แกน x

!เลือกโหนดที่ต้องการจะใส่แรง แกน y

!เลือกโหนดที่ต้องการจะใส่แรง แกน z

!ใส่การกำจัดลงไปบนโหนดที่เลือกไว้

nset, s, loc, แกน, ตำแหน่ง

d, all, ux,,,, uy, uz

nset, all

Solve

Finish

!เลือกโหนดที่ต้องการจะยึด

!ยึดทั้งแถว

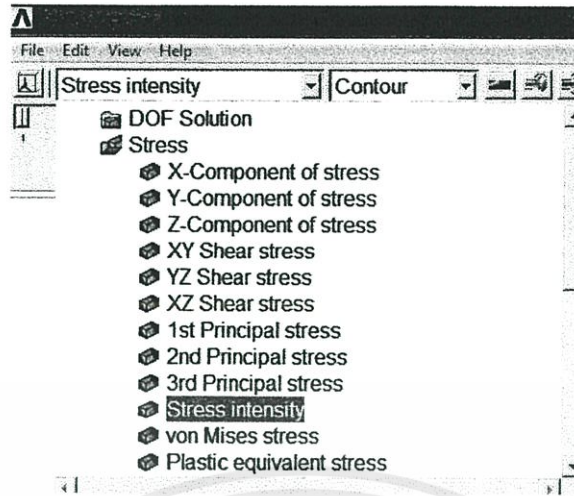
จากนั้นจึงนำโครงสร้างที่ได้ใส่การกำจัดลงไปในโปรแกรมวิเคราะห์หาค่าความเค้นของโครงสร้างดังรูป 3.15 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจำลองโครงสร้างที่มีการแสดงค่าความเค้นออกมาดังในรูป 3.16 หากว่าค่าความเค้นที่ได้มีการกระจายตัวน้อยเกินไป หรือมีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นจึงควรที่เปลี่ยนขนาด หรือเปลี่ยนรูปแบบปริมาตรของโครงสร้างเพื่อทำให้มีค่าความเค้นให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะเพียโซอิเล็กทริกนั้นอาศัยการเคลื่อนที่เพื่อทำให้กำเนิดพลังงาน เพราะฉะนั้นยิ่งอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมีความเค้นมาก วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาติดบนโครงสร้างก็จะยังมีความเค้นมากตาม จึงทำให้ให้กำเนิดพลังงานได้มากกว่าโครงสร้างที่มีค่าความเค้นน้อย

#### ANSYS Main Menu

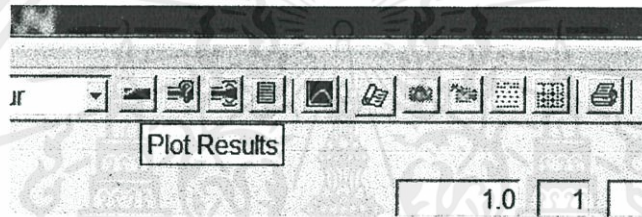
- ☐ Preferences
- ☐ Preprocessor
- ☐ Solution
- ☐ General Postproc
  - ☐ Data & File Opts
  - ☐ Results Summary
  - ☐ Read Results
  - ☐ Failure Criteria
  - ☐ Plot Results
  - ☐ List Results
  - ☐ Query Results
  - ☐ Options for Outp
  - ☐ Results Viewer

(ก) เข้า ANSYS Main Menu -> General Postproc -> Results Viewer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) จากนั้นเลือกดู Stress -> Stress intensity



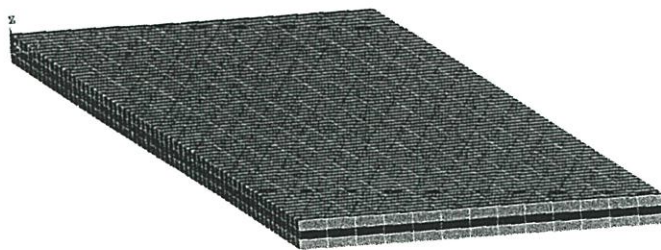
(ค) แล้วเลือก Plot Results

รูปที่ 3.15 การหาค่าความเค้นของโครงสร้างใดๆ



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างโครงสร้างที่มีการแสดงค่าความเค้นโดยที่สียิ่งแดงยิ่งมีค่าความเค้นมาก

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไปแล้ว แต่ในความเป็นจริงนั้น การจะสั่งวัสดุเพียงโซลิดเล็กทริกที่โครงสร้างพอดีกับ โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้ออกแบบไว้ในข้างต้นนั้น มีราคาที่สูง และใช้ระยะเวลาในการตัดนาน เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุเพียงโซลิดเล็กทริกสำเร็จรูปที่ติดมากับวัสดุอื่นอยู่แล้วดังรูปที่ 3.16 ที่แถมยังไม่สามารถเลือกขนาดได้ตามต้องการ อีกทั้งยังไม่สามารถเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างได้ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษา คุณสมบัติทุกอย่างของโครงสร้างใหม่



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป โดยที่สีฟ้าคือวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และสีบานเย็นคือวัสดุอื่น

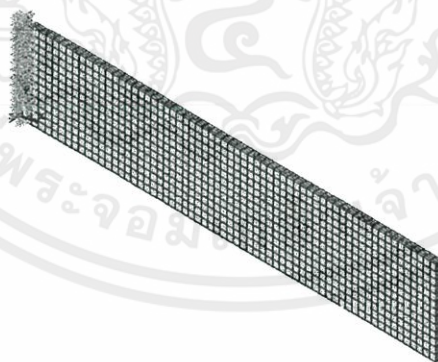
หากทราบขนาด และคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป ก็สามารถที่จะนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้จำลองหา ค่าความถี่, การก่าจัดสูงสุด และความเค้นของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 ได้ โดยทำตามหัวข้อ 3.2.2

### 3.2.6 การปรับเปลี่ยนความถี่ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

เนื่องจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปไม่สามารถเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างได้ การจะเปลี่ยนความถี่นั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งการยึด หรือเพิ่มมวล เพื่อให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้นมีความถี่ที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่ยึด และน้ำหนักมวลที่ใส่เพิ่มเข้าไป

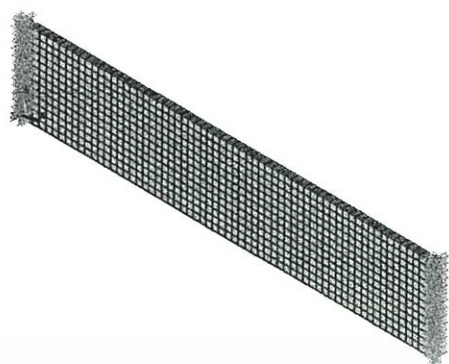
#### 3.2.6.1 การยึดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

การที่จะยึดโครงสร้างๆ ใดๆ นั้นทำได้หลายรูปแบบ ดังรูป 3.18 เช่น การยึดด้านเดียว (Cantilever), การยึดสองด้าน (Bridge) และ การยึดรอบด้าน (Membrane) เป็นต้น การยึดแต่ละแบบนั้น ก็จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้นเปลี่ยนแปลงไปได้หลายรูปแบบ

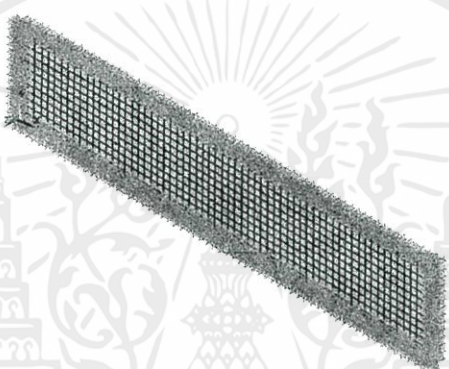


(ก) การยึดด้านเดียว (Cantilever)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



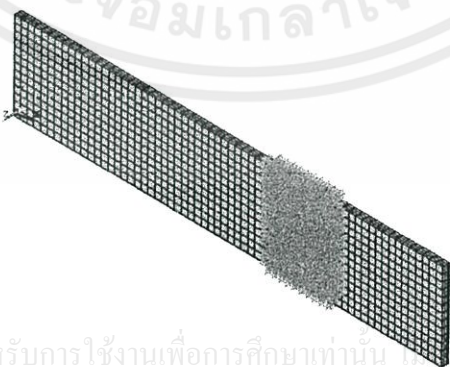
(ข) การยึดสองด้าน (Bridge)



(ค) การยึดรอบด้าน (Membrane)

รูปที่ 3.18 การยึดโครงสร้างในแบบต่างๆ

การยึดโครงสร้างนั้น ยังสามารถยึดบริเวณกลางโครงสร้างดังรูปที่ 3.19 หรือก็คือการเปลี่ยนความยาวของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั่นเอง เมื่อความยาวลดลงความถี่ในการสั่น หรือความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ก็จะเพิ่มขึ้นตาม แต่ในทางตรงกันข้ามถ้ายังยึดให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้สั้นลง แอมพลิจูดในการสั่นก็จะลดลงตาม หรือก็คือสั้นน้อยลงนั่นเอง



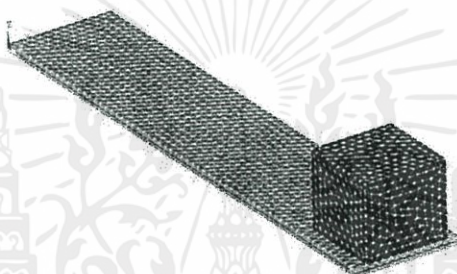
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 การเปลี่ยนความยาวของโครงสร้าง

จากรูป 3.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการยึดโครงสร้างที่บริเวณตรงกลางจะทำให้เหมือนมี โครงสร้าง 2 ชั้นมาต่อกันซึ่งแต่ละชั้นนั้นก็จะมีค่าความถี่เฉพาะตัว นั่นคือด้านที่สั้นกว่าก็จะสั้นที่ความถี่สูงกว่าด้านที่ยาว ผลการวิเคราะห์นี้ทำให้สามารถออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่สามารถสั้นได้ 2 ความถี่ นั่นคือเมื่อ สะพานสั้นที่ความถี่สูงด้านสั้นก็จะสั้น ในทางกลับกันถ้าสะพานสั้นที่ความถี่ต่ำด้านยาวก็จะสั้นตามนั่นเอง

### 3.2.6.2 การตีความ ณ จุดที่เกิดการกักเก็บสูงสุด

สามารถเปลี่ยนความถี่ของแบบจำลองได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างโดยการตีความขนาดต่างๆ ดังรูป 3.20 ลงไปในจุดที่เกิดการกักเก็บสูงสุดจะสามารถทำให้ความถี่เปลี่ยนไปได้ (ความถี่ลดลงเนื่องจาก น้ำหนักมากขึ้น) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานก็สามารถทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงได้



รูปที่ 3.20 โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปที่ตีความ

หลังจากที่ได้ทดลองจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแล้วทำให้ทราบ ค่าความถี่, ค่าการกักเก็บ และค่าความเค้น ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแต่ในความเป็นจริงแล้วค่าต่างๆ ที่จำลองมาได้จากโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 นั้นมีโอกาสคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นจึงควรนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไปทดสอบจริงก่อนใช้งาน

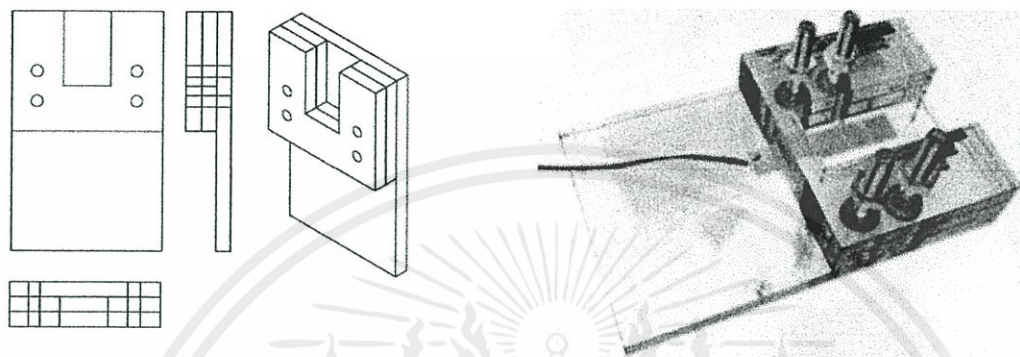
## 3.3 การทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

การทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น เริ่มจากการออกแบบตัวยึดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานดังที่ได้จำลองการยึดในแบบต่างๆ ในหัวข้อ 3.2.3.1 จากนั้นจึงนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้ไปทดสอบหาว่ามี ความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับโครงสร้างได้ออกแบบไว้หรือไม่

### 3.3.1 การทดสอบหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

จากการที่ได้ศึกษาทฤษฎีการหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ใดๆ ในหัวข้อที่ 2.3 การที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะให้พลังงานสูงสุดนั้น จำเป็นต้องปรับค่าความถี่ให้ตรงกับค่าความถี่ของสะพาน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยป้อนความถี่เข้าไปในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และเปลี่ยนค่าไปจนกว่าจะพบความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แต่หากความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้นยังไม่ตรงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน ก็จำเป็นต้องปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานดังในหัวข้อที่ 3.2.3 นั่นคือการเปลี่ยนด้านยึด หรือตีความขนาดต่างๆ

แต่ทว่าในการใช้งานจริงนั้นการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจำเป็นต้องยึดด้วยโครงสร้างที่มีมั่นคง ดังรูป 3.21 เพื่อป้องกันไม่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้น เปลี่ยนจากการเคลื่อนตำแหน่งของ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เนื่องจากโครงสร้างที่ยึดไม่แน่น เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างที่จะ ใช้ยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยจะต้องออกแบบช่วงความกว้างที่จะใช้ในการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังรูป 3.18 เป็นการยึดบริเวณกลางวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วยความกว้าง 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.21 โครงสร้างอะคริลิกยึดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากที่ปรับความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของ สะพานแล้ว จึงนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไปติดตั้งบนสะพานบริเวณเดียวกันกับที่ติดตั้ง อุปกรณ์วัดการ สั่นสะเทือน (Accelerometer) เพื่อที่จะทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานว่าสามารถให้กำเนิดพลังงานได้ ขนาดไหน แล้วจึงนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไปปรับแก้ต่อไป

### 3.3.2 การทดสอบวัดพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากที่ปรับความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของ สะพานแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำอุปกรณ์ไปติดตั้งบนสะพานเพื่อ ทำการวัดตามโครงสร้างต่างๆ ของสะพานเพื่อ ตรวจสอบหาโครงสร้างของสะพานที่สามารถให้พลังงานได้มากที่สุด หลังจากก็นำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไป ติดตั้งบนสะพานแล้วจึงนำ Oscilloscope ในหัวข้อที่ 2.5 ไปวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน จากนั้นจึงนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ต่อไป

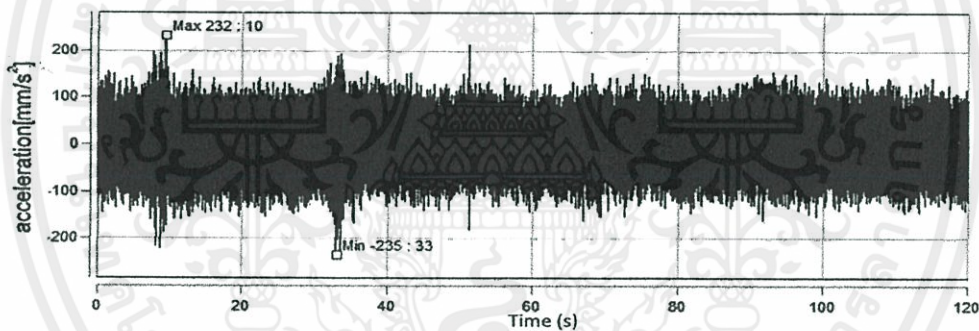
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

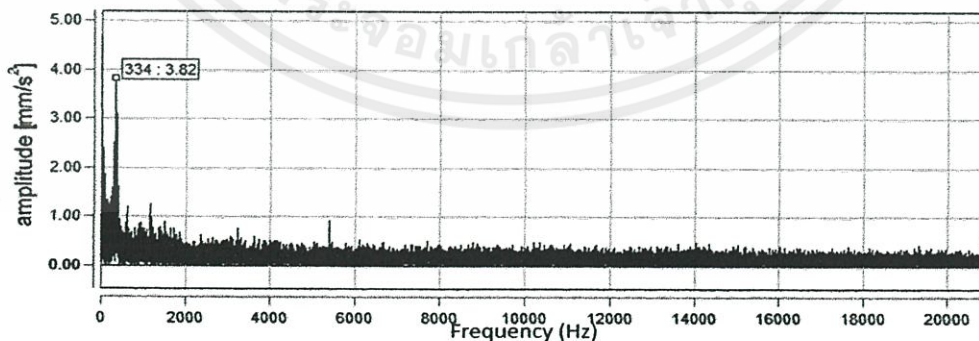
จากการนำอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนไปทำการวัดตามโครงสร้างต่างๆ ของสะพาน ซึ่งได้ทำการทดลองโดยที่ได้เลือกวัดข้อมูลการสั่นที่สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังรูปที่ 3.1 เพื่อทำการวัดในกรณีต่างๆ และหาว่าบริเวณไหนของสะพานมีการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุด ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองการสั่นสะเทือนของสะพาน

จุดแรกที่เราได้ทำการทดลองคือ บริเวณพื้นถนนบนสะพาน ดังรูป 3.2 (ค) ทั้งช่วงที่มีรถวิ่งผ่าน และไม่มีรถวิ่งผ่าน โดยติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) ของบริษัท ERBESSD Instrument ไว้บนพื้นถนนบริเวณกลางสะพาน ซึ่งเป็นบริเวณที่สะพานมีการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุด ทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง ครั้งละ 2 นาที จากการทดลองทำให้ได้ข้อมูลกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลา และนำข้อมูลนี้มาทำ Fast Fourier Transform เพื่อหาความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุด ดังรูปที่ 4.1.1 ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 30 ครั้ง



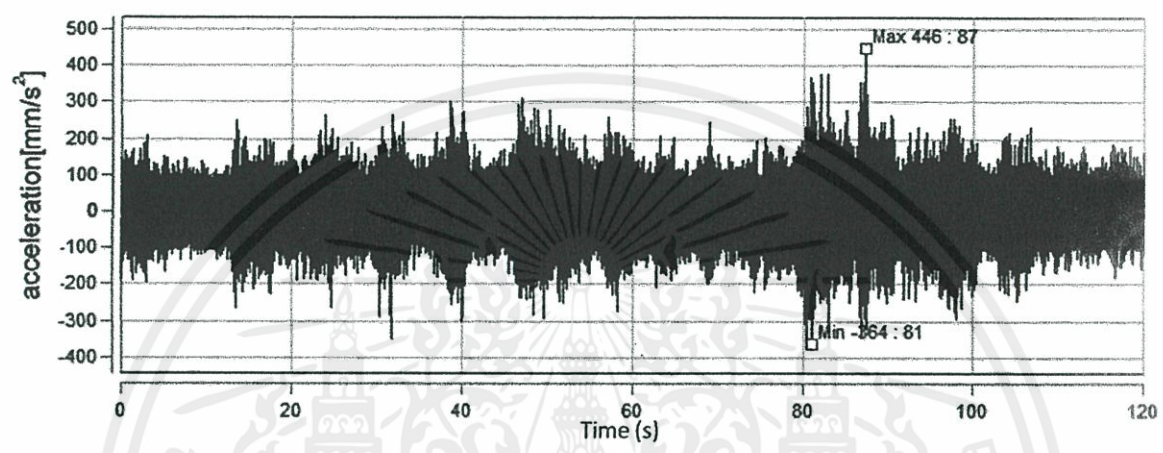
(ก) หนึ่งในกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณพื้นถนนบนสะพาน



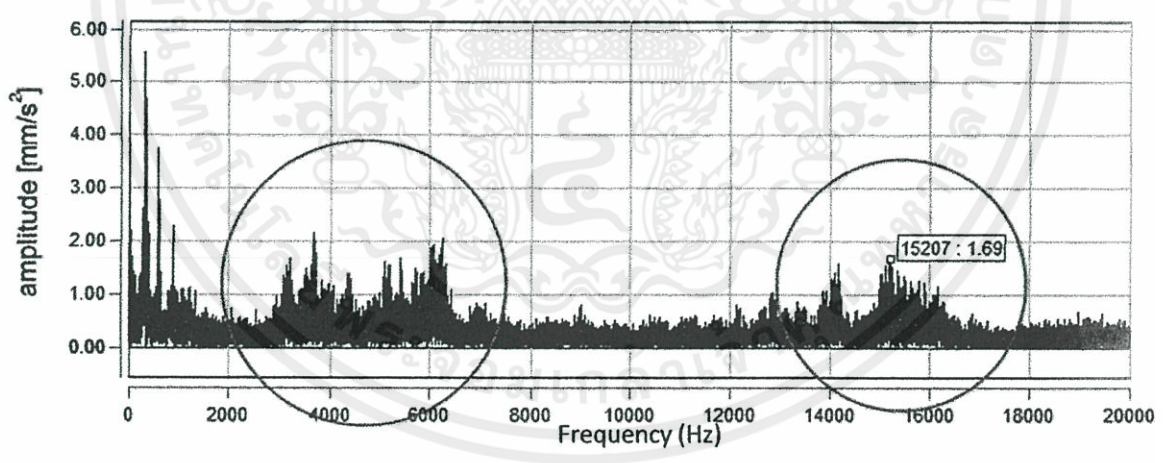
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ข) หนึ่งในกราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาทีจากการวัดบริเวณพื้นถนนบนสะพาน  
รูปที่ 4.1.1 ผลการทดลองบริเวณพื้นถนนบนสะพาน

จุดที่สองที่เราได้ทำการทดลองคือ บริเวณราวสะพานแวนดิง ดังรูป 3.2 (ก) ทั้งช่วงที่มีรถวิ่งผ่าน และไม่มีรถวิ่งผ่าน โดยติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) ของบริษัท ERBESSD Instrument ไว้บนราวสะพานแวนดิงบริเวณกลางสะพาน ซึ่งเป็นบริเวณที่สะพานมีการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุด และทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง ครั้งละ 2 นาที จากการทดลองทำให้ได้ข้อมูลกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลา และนำข้อมูลนี้มาทำ Fast Fourier Transform เพื่อหาความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุด ดังรูปที่ 4.1.2 ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 30 ครั้ง



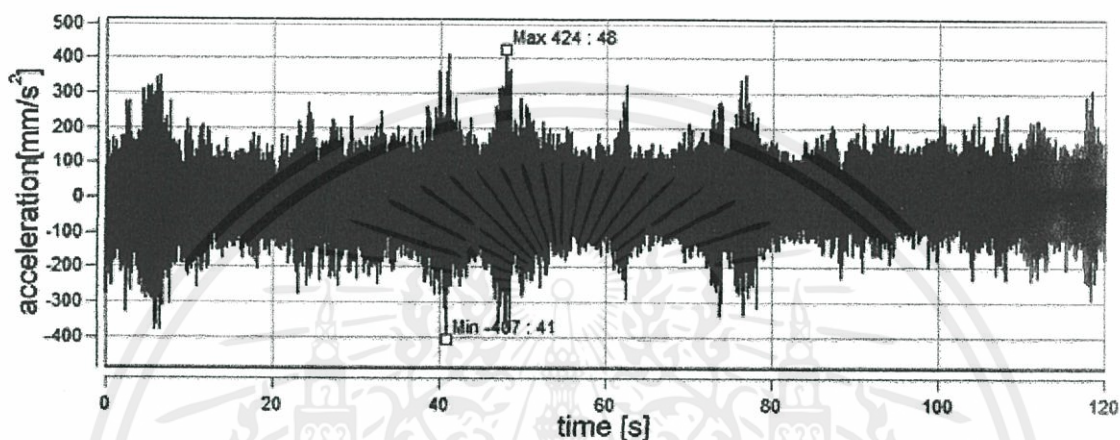
(ก) หนึ่งในกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแวนดิง



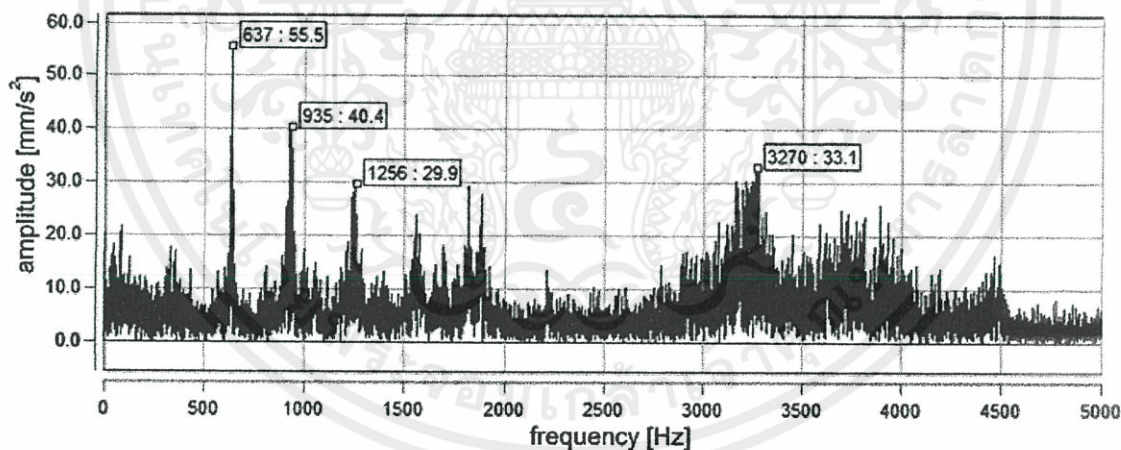
(ข) หนึ่งในกราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาทีจากการวัดบริเวณราวสะพานแวนดิง รูปที่ 4.1.2 ผลการทดลองบริเวณราวสะพานแวนดิง

จากการนำข้อมูลมาทำ Fast Fourier Transform พบว่าบริเวณราวสะพานแวนดิง ในรูปที่ 4.1.2 (ข) มีค่าความถี่เพิ่มขึ้นมาเมื่อเทียบกับ บริเวณพื้นถนนบนสะพานในรูปที่ 4.1.1 (ข) ซึ่งมีความถี่เพิ่มขึ้นมา 2 ช่วงแรกๆ และไม่พบแอมพลิจูดที่สูงกว่า

จุดที่สามที่เราได้ทำการทดลองคือ บริเวณราวสะพานแวนอน ดังรูป 3.2 (ก) ทั้งช่วงที่มีรถวิ่งผ่าน และไม่มีรถวิ่งผ่าน โดยติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) ของบริษัท ERBESSD Instrument ไว้บนราวสะพานแวนอนบริเวณกลางสะพาน ซึ่งเป็นบริเวณที่สะพานมีการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุด และทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง ครั้งละ 2 นาที จากการทดลองทำให้ได้ข้อมูลกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลา และนำข้อมูลนี้มาทำ Fast Fourier Transform เพื่อหาความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุด ดังรูปที่ 4.1.3 ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 30 ครั้ง



(ก) หนึ่งในกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแวนอน



(ข) หนึ่งในกราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาทีจากการวัดบริเวณราวสะพานแวนอนรูปที่ 4.1.3 ผลการทดลองบริเวณราวสะพานแวนอน

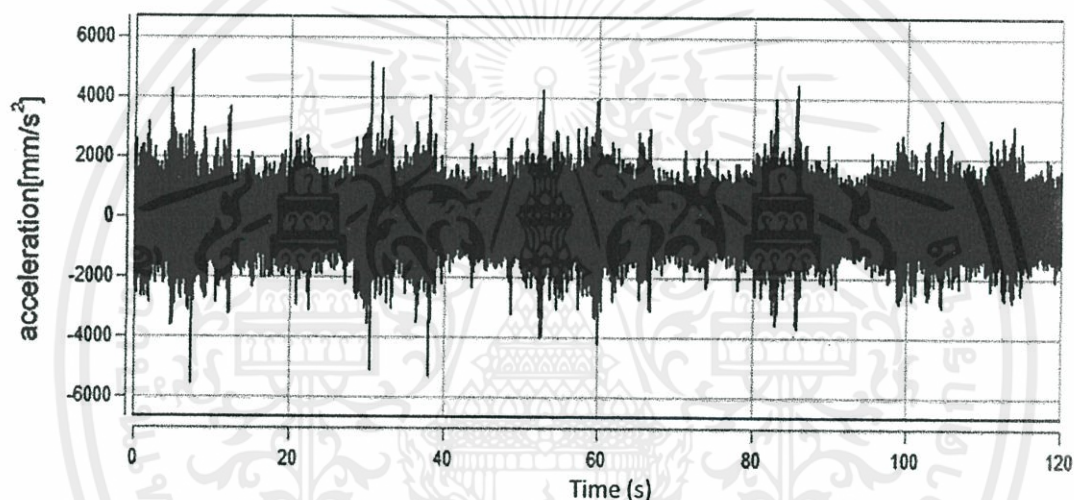
จากการทดลองทั้งสามบริเวณ เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาทำ Fast Fourier Transform พบว่า บริเวณราวสะพานแวนอนในรูปที่ 4.1.3 (ข) มีค่าความถี่เป็นจำนวนมากที่สุด และมีแอมพลิจูดสูงสุด จึงเลือกผลการทดลองบริเวณราวสะพานแวนอนนี้เพื่อใช้ในการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน

## 4.2 ความถี่และแอมพลิจูดของรถแต่ละประเภท

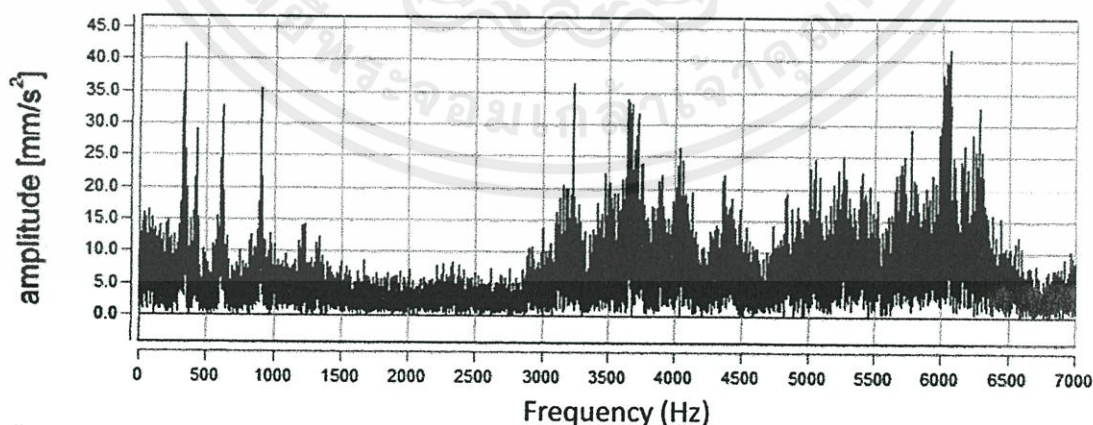
จากการทดลองวัดการสั่นของสะพานทั้งสามบริเวณ พบว่าบริเวณราวสะพานแนวนอนมีค่าความถี่มากที่สุด และแอมพลิจูดสูงสุด จึงเลือกใช้บริเวณราวสะพานแนวนอนออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ และได้ทำการทดลองเพื่อแยกความถี่ของรถแต่ละประเภท ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

### 4.2.1 ความถี่ของสะพานเมื่อมีรถวิ่งผ่าน

จากการทดลองวัดความถี่ของสะพาน บริเวณราวสะพานแนวนอน จากการทดลองทำให้ได้ข้อมูลกราฟแสดงความเร็วเทียบกับเวลา และนำข้อมูลนี้มาทำ Fast Fourier Transform เพื่อหาความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุด การวัดทั้งหมด 5 ครั้ง

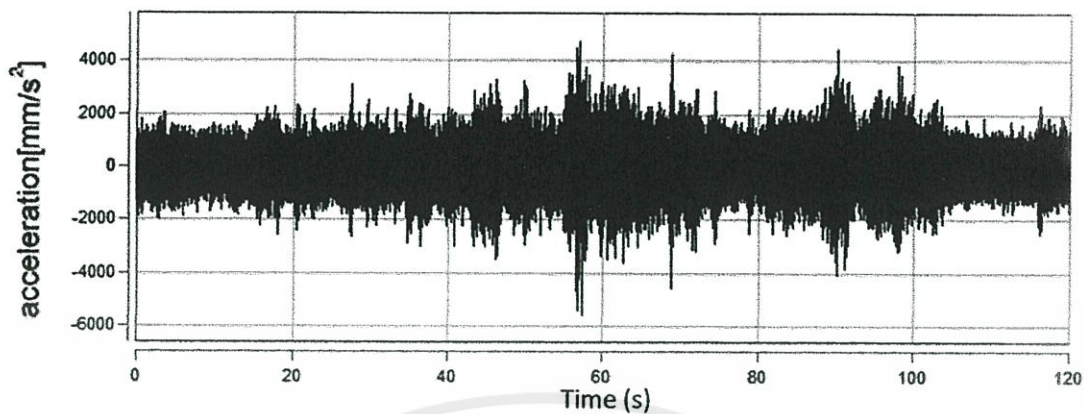


(ก) กราฟแสดงความเร็วเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแนวนอน

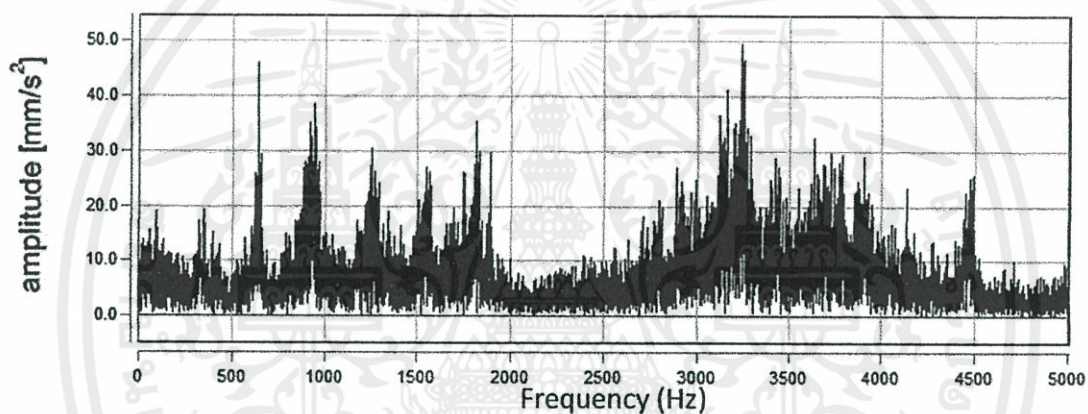


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ

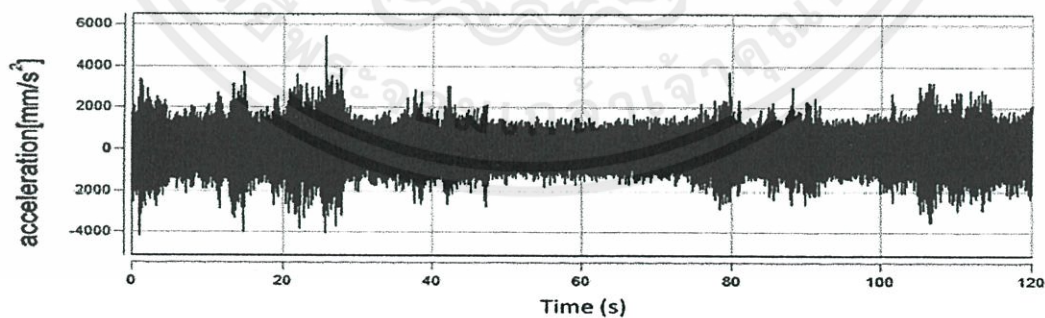
รูปที่ 4.2.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1 บริเวณราวสะพานแนวนอน



(ก) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแวนอน

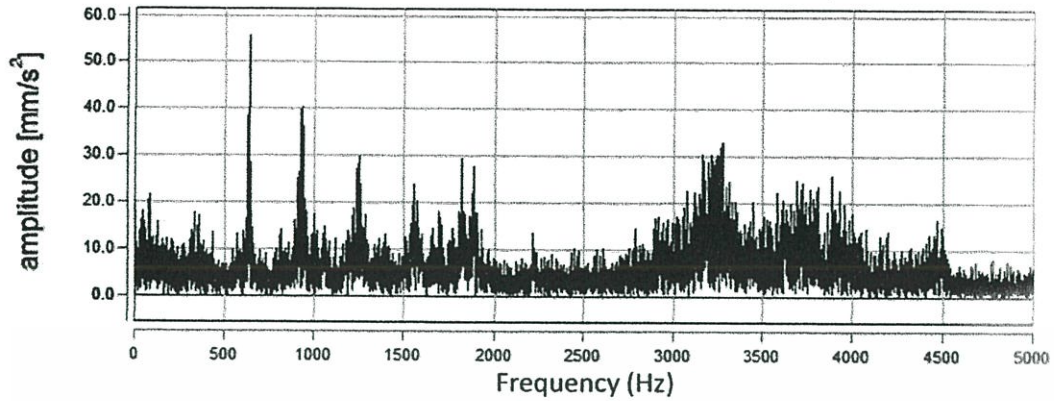


(ข) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาทีจากการวัดบริเวณราวสะพานรูปที่ 4.2.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2 บริเวณราวสะพานแวนอน

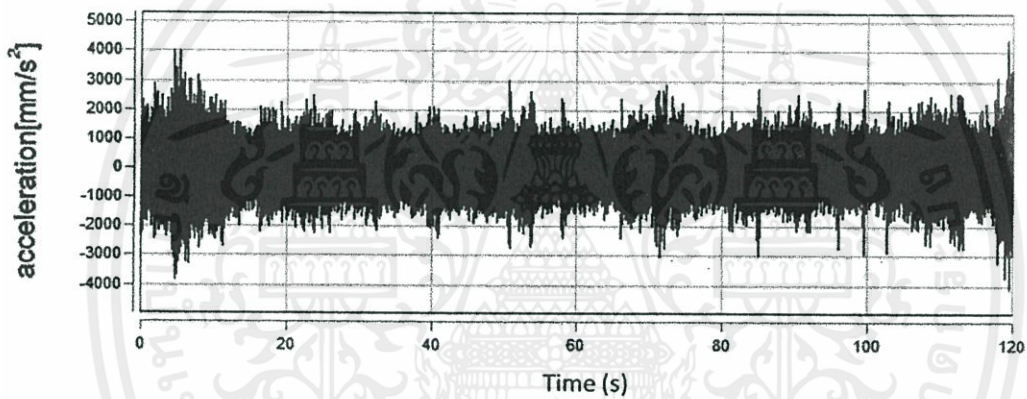


(ค) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแวนอน

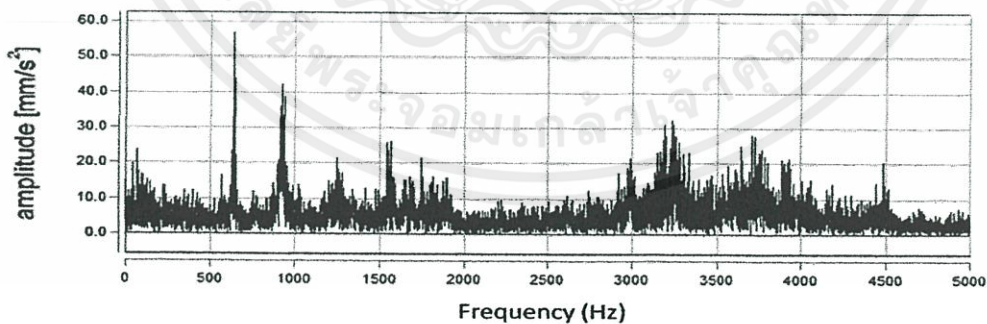
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาที่จากการวัดบริเวณราวสะพาน  
รูปที่ 4.2.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3 บริเวณราวสะพานแนวนอน

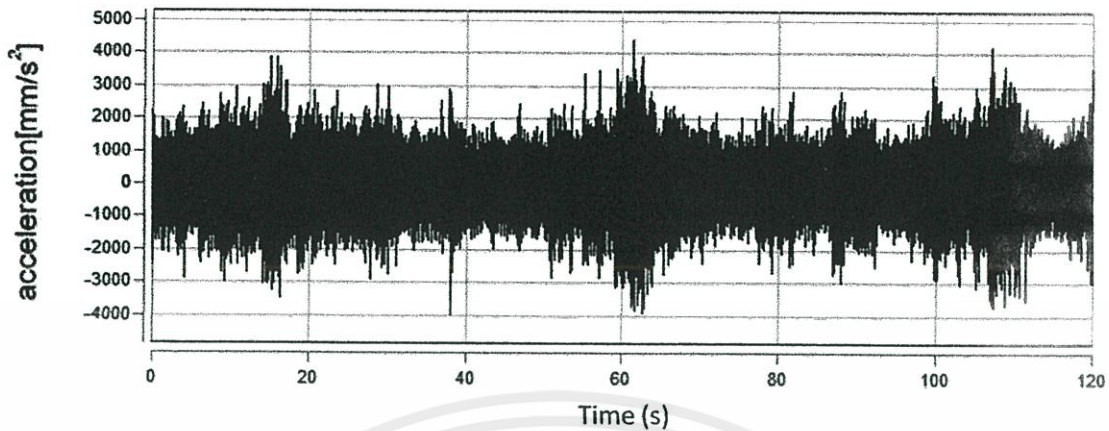


(ก) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแนวนอน

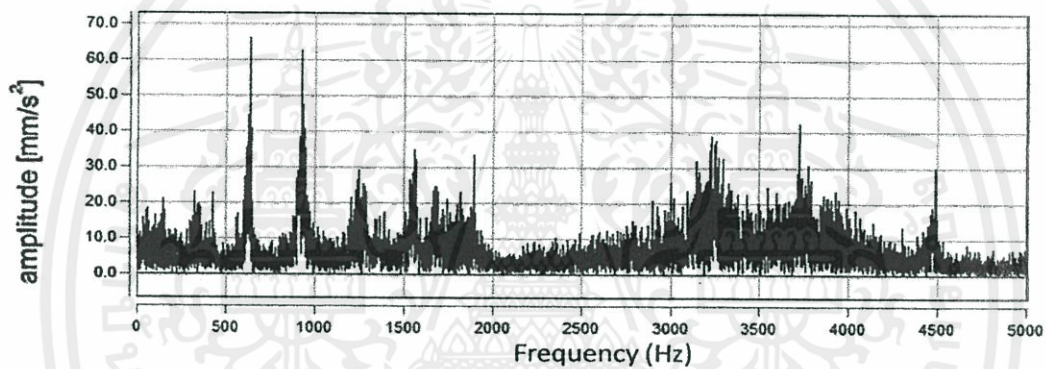


(ข) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาที่จากการวัดบริเวณราวสะพาน  
รูปที่ 4.2.4 ผลการทดลองครั้งที่ 4 บริเวณราวสะพานแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพานแนวนอน



(ข) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ในช่วงเวลาสองนาทีจากการวัดบริเวณราวสะพานรูปที่ 4.2.5 ผลการทดลองครั้งที่ 5 บริเวณราวสะพานแนวนอน

จากการทดลองวัดความถี่ของสะพาน บริเวณราวสะพานแนวนอน ทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้ง ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน โดยความถี่จะอยู่ในช่วง 300Hz – 800Hz , 900Hz – 1kHz , 1.5kHz – 2kHz , 2.5kHz – 4kHz และ 4kHz – 7kHz

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความถี่ของรถแต่ละประเภท

จากการทดลองวัดความถี่ของสะพาน เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์พบว่า ความถี่และแอมพลิจูดของรถแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน จึงนำข้อมูลความถี่ที่ทำการทดลองได้มาวิเคราะห์ โดยทำการบันทึกวิดีโอในขณะที่ทำการทดลอง แล้วนำกราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลามาเทียบกับวิดีโอที่ได้บันทึกไว้ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 1

ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	4.0-7.0
รถเก๋ง					6.056
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ/รถครอบครัว/เก๋ง					6.064
รถบรรทุก					5.975
รถเก๋ง					6.016
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					6.056
รถกระบะ/รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					5.774
รถกระบะ					5.892
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)					6.036
รถเก๋ง/รถกระบะ2คัน/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)					5.996
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					6.299
รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)				3.715	
รถครอบครัว/รถกระบะมีของ2คัน				3.674	
รถบรรทุก/รถตู้/รถเก๋ง2คัน/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)					5.248
รถกระบะ					6.056
รถเก๋ง					5.285
รถเก๋ง				3.19	
รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะมีของ/รถกระบะ					5.996
รถกระบะ					6.178
รถเก๋ง				3.714	
รถเก๋ง					5.774
รถบรรทุก(ฝั่งตรงข้าม)					5.814
รถบรรทุก					5.855
รถเก๋ง2คัน(ฝั่งตรงข้าม)					5.794
รถเก๋ง/รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม) /รถตู้/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ					3.694

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิศวกรรมจราจรใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 2

ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	4.0-7.0
รถเก๋ง					6.056
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ/รถครอบครัว/เก๋ง					6.064
รถบรรทุก					5.975
รถเก๋ง					6.016
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					6.056
รถกระบะ/รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					5.774
รถกระบะ					5.892
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)					6.036
รถเก๋ง/รถกระบะ2คัน/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)					5.996
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					6.299
รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)				3.715	
รถครอบครัว/รถกระบะมีของ2คัน				3.674	
รถบรรทุก/รถตู้/รถเก๋ง2คัน/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)					5.248
รถกระบะ					6.056
รถเก๋ง					5.285
รถเก๋ง				3.19	
รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะมีของ/รถกระบะ					5.996
รถกระบะ					6.178
รถเก๋ง				3.714	
รถเก๋ง					5.774
รถบรรทุก(ฝั่งตรงข้าม)					5.814
รถบรรทุก					5.855
รถเก๋ง2คัน(ฝั่งตรงข้าม)					5.794
รถเก๋ง/รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม) /รถตู้/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ				3.694	

คณะกรรมนี้เป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 3

ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	4.0-7.0
รถกระบะ/รถตู้(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)		0.928			
รถบรรทุกเล็ก/รถเก๋ง/รถกระบะ/รถครอบครัว/รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)				3.159	
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถบรรทุกเล็ก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)			1.252		
รถตู้(ฝั่งตรงข้าม)/รถบัส/รถกระบะ				3.229	
รถบรรทุกเล็ก				3.27	
รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)				3.23	
รถบรรทุก				2.221	
รถกระบะ2คัน/เก๋ง				3.805	
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)				3.27	
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ				3.311	
รถเก๋ง					4.482
รถบรรทุกเล็ก/รถเก๋ง/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถกระบะ3คัน		0.646			
รถเก๋ง3คัน/รถบรรทุกเล็ก				3.896	

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 4

ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	2.5-4.0
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม) /รถกระบะ/รถเก๋ง/รถบรรทุก(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถบัส(ฝั่งตรงข้าม) /รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)2คัน		0.924			
รถกระบะมีของ(ฝั่งตรงข้าม)	0.646				
รถเก๋ง/รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)					4.482
รถเก๋ง				3.795	

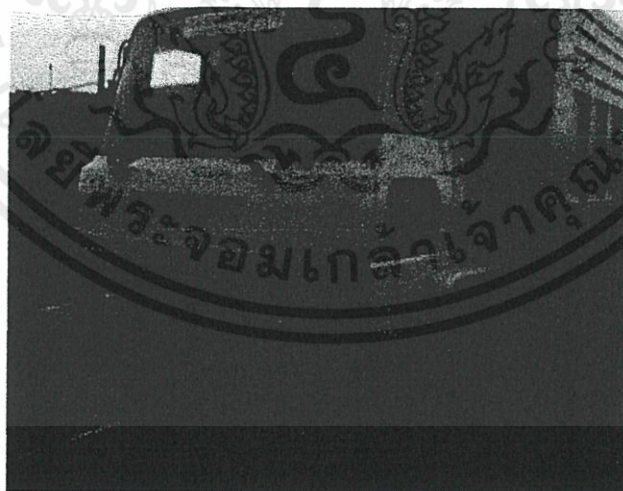
ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	2.5-4.0
รถกระบะมีของ				3.149	
รถเก๋ง				3.23	
รถกระบะ				3.27	
รถครอบครัว		0.929			
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)				3.149	
รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะมีของ(ฝั่งตรงข้าม)/รถเก๋ง/ รถบรรทุกเล็ก(ฝั่งตรงข้าม)				3.937	
รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)	0.646				
รถกระบะ				3.149	
รถเก๋ง2คัน				3.896	
รถกระบะมีของ(ฝั่งตรงข้าม)/รถเก๋ง				3.25	
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)				3.149	
รถเก๋ง/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/ รถตู้(ฝั่งตรงข้าม)/รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/ รถบรรทุกเล็ก		0.929			
รถบรรทุก/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)/ รถบรรทุก(ฝั่งตรงข้าม)				3.23	

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวิเคราะห์ความถี่ของรถจากการวัดความถี่ของสะพานครั้งที่ 5

ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	2.5-4.0
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)		0.929			
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถบรรทุกเล็ก/รถเก๋ง	0.626				
รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)/รถครอบครัว/ รถกระบะ/รถบรรทุก		0.929			
รถกระบะ4คัน/รถเก๋ง3คัน/รถตู้/ รถตู้(ฝั่งตรงข้าม)/รถกระบะ2คัน/รถเก๋ง(ฝั่งตรงข้าม)		0.939			
รถเก๋ง				3.916	

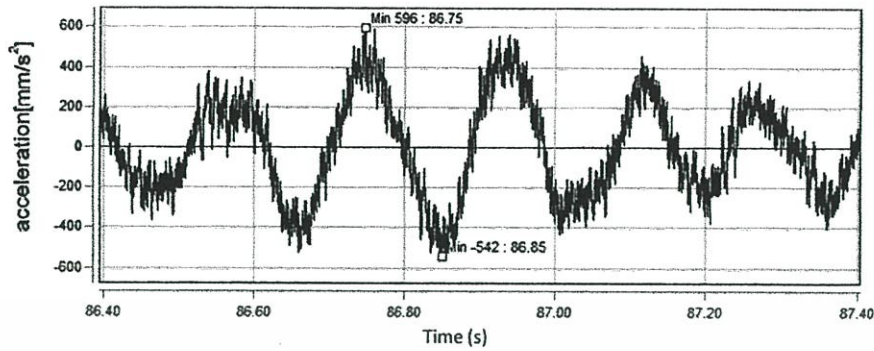
ประเภทของรถ	ช่วงความถี่(kHz)				
	0.3-0.8	0.9-1.0	1.5-2.0	2.5-4.0	2.5-4.0
รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)				3.452	
รถเก๋ง				3.25	
รถเก๋ง5คัน/รถบรรทุก/รถกระบะ3คัน/ รถปุน/รถบรรทุก(ฝั่งตรงข้าม)		0.929			
รถเก๋ง2คัน				3.25	
รถกระบะ/รถตู้				3.775	
รถเก๋ง/รถกระบะมีของ(ฝั่งตรงข้าม)/ รถบรรทุก		0.928			
รถกระบะ3คัน/รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม)				3.21	
รถเก๋ง(ตรงข้าม)				3.23	
รถบรรทุก(ฝั่งตรงข้าม)2คัน/รถตู้/รถเก๋ง/ รถกระบะ		0.929			
รถกระบะ(ฝั่งตรงข้าม)				3.267	
รถครอบครัว(ฝั่งตรงข้าม)		0.929			

จากตารางผลการแยกความถี่ของรถแต่ละประเภท พบว่ารถที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุก จะมีความถี่ในย่านต่ำ คือ 300Hz – 1kHz แต่จะมีแอมพลิจูดที่สูง ดังรูปที่ 4.2.6 และรถที่มีน้ำหนักเบา เช่น รถเก๋ง จะมีความถี่ที่สูง ซึ่งมีค่าความถี่ประมาณ 3kHz – 5kHz

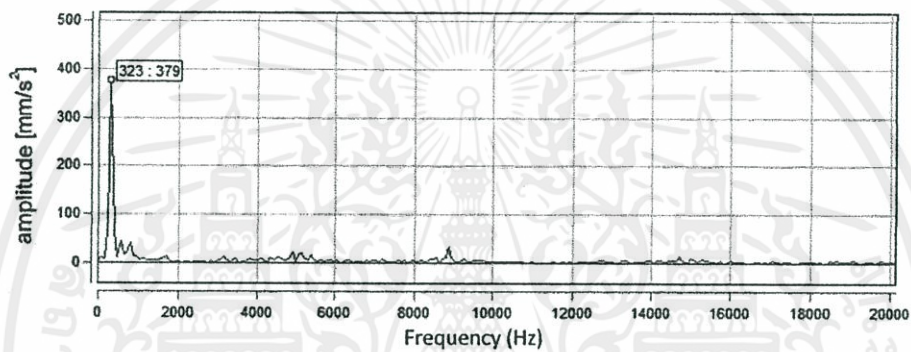


(ก) รถบรรทุกของที่มีน้ำหนักมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

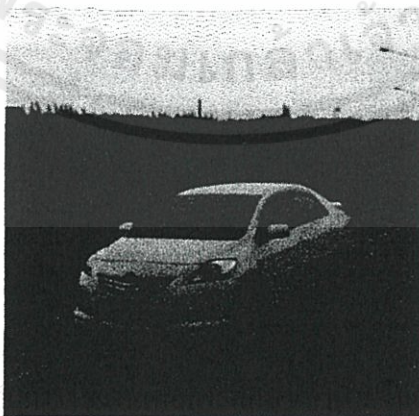


(ข) กราฟความเร่งเทียบกับเวลาเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่าน



(ค) กราฟแอมพลิจูดเทียบกับความถี่เมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่าน  
รูปที่ 4.2.6 ผลการทดลองวัดความถี่ของสะพานเมื่อมีรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่าน

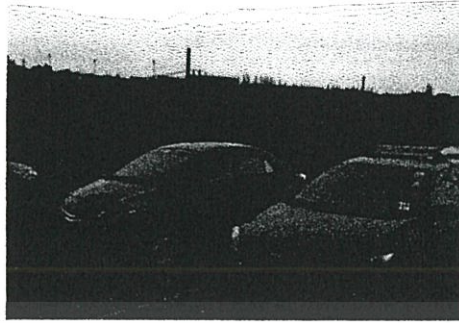
จากรูปที่ 4.2.6 จะเห็นว่าความถี่ที่ต่ำจะมีแอมพลิจูดที่สูง ซึ่งจะสามารถทำให้อุปกรณ์กำเนิดพลังงานสามารถให้แรงดันไฟฟ้าที่สูง แต่เนื่องจากการมีแอมพลิจูดที่สูง อุปกรณ์อาจเกิดการชำรุดได้ง่าย หรือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานจะสั้นลง



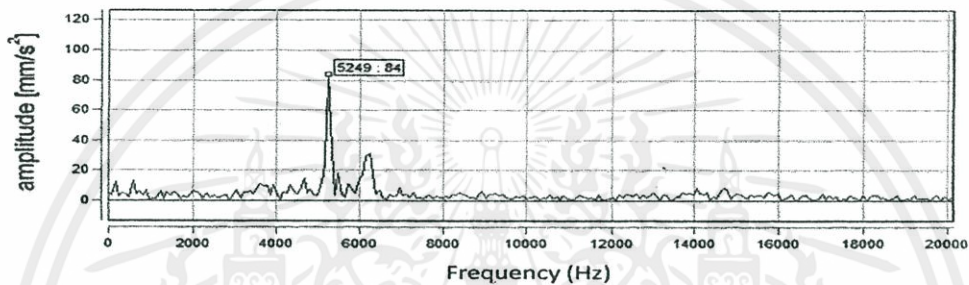
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

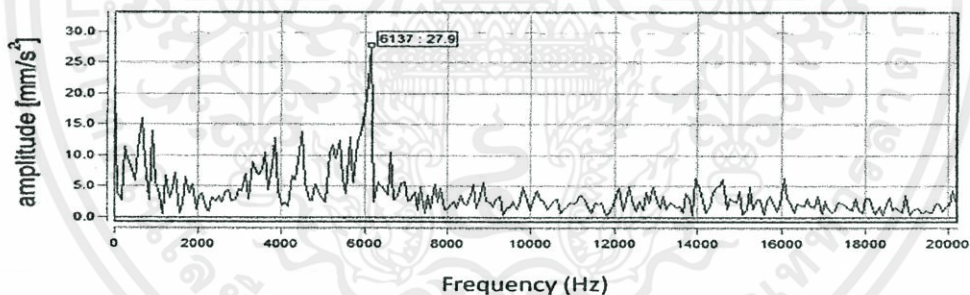
(ก) รถน้ำหนักเบา



(ข) รถน้ำหนักรเบที่มีจำนวนมากขึ้น



(ค) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของรถน้ำหนักรเบ 1 คัน



(ง) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของรถน้ำหนักรเบเมื่อมีจำนวนมากขึ้น

รูปที่ 4.2.7 ผลการทดลองวัดความถี่ของสะพานเมื่อมีน้ำหนักรเบวิ่งผ่านทั้งจำนวน 1 คันและหลายคัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อรถที่มีน้ำหนักรเบวิ่งผ่าน ความถี่ที่วัดได้จะมีย่านความถี่ที่สูง แต่แอมพลิจูดจะต่ำกว่าเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งผ่าน ในรูปที่ 4.2.6 แต่ความถี่ที่ต่ำจะมีโอกาสการเกิดมากกว่าเนื่องจากจำนวนรถเล็กจะผ่านบริเวณสะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังมากกว่า ซึ่งความถี่ในที่ได้ทั้งต่ำและสูงนี้จะนำไปวิเคราะห์และทำการทดลองในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

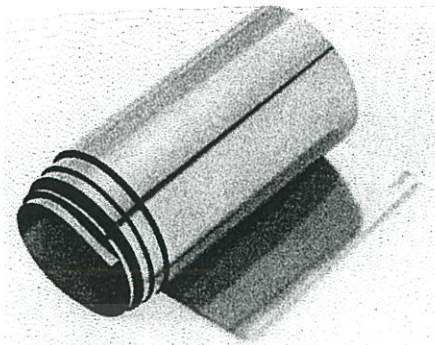
การออกแบบ และจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานทำโดยการทดลองเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปทรงต่างๆ เช่น รูปหลายเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมู แล้วจึงนำรูปจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมายึดในรูปแบบ Cantilever และ Bridge เพื่อทดสอบว่ารูปจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่างๆ มีความถี่ต่างกันอย่างไร ดังรูปที่ 4.3.1 โดยที่ทั้งสองรูปแบบมีขนาดกว้าง 50 ไมครอน ยาว 50 ไมครอน และหนา 10 ไมครอน แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้ได้ความถี่ที่ตรงกับความถี่การสั่นของสะพาน



#### 4.3.1 วัสดุที่ใช้ในการจำลองโครงสร้าง

วัสดุที่สามารถหาซื้อได้ และสามารถหาข้อมูลคุณสมบัติตามหัวข้อที่ 3.2.1 ได้นั้นมีหลายประเภท แต่วัสดุที่ราคาคุ้มค่ากับคุณภาพที่ได้มานั้น คือ สแตนเลสสามศูนย์สี่ (SUS 304) ดังรูป 4.3.2 ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ หรือสนิม ได้พอสมควร ในส่วนของข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบนั้นมีค่า ความหนาแน่น (Density) = 8g/cc, Poisson's ratio = 0.29 และ Young's modulus = 193 to 200 GPa โดยที่ข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต่อการออกแบบ แบบจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเนื่องจากเป็นค่าที่ใช้แบ่งแยกวัสดุในโครงสร้าง

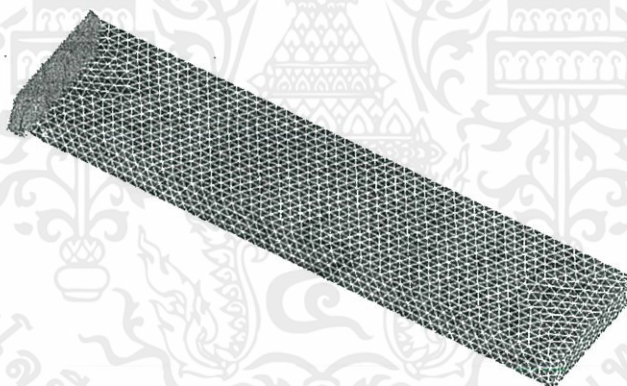
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.2 Shim Stainless Steel 304 [9]

#### 4.3.2 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากที่ได้ข้อมูลที่เป็นในการออกแบบมาแล้ว ขั้นตอนแรกของการจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น คือการสร้างโครงสร้างต่างๆ ที่ต้องการทดสอบหาค่าความเค้น เช่น รูปหลายเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมู แล้วจึงนำรูปจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมายึดในรูปแบบ Cantilever ดังรูป 4.3.3 และยึดในรูปแบบ Bridge ดังรูป 4.3.4 แล้วจึงเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างแต่ละชนิด ให้มีความถี่เรโซแนนซ์ ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน



(ก) โครงสร้าง กว้าง 4 มิลลิเมตร x ยาว 16 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3199.5 เฮิร์ตซ์

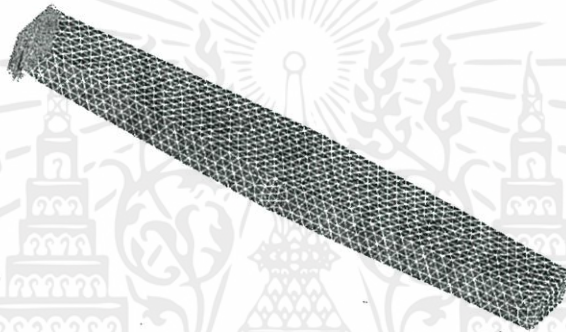


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น หากนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) โครงสร้าง กว้าง 4 ถึง 2 มิลลิเมตร x ยาว 17.7 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3198.2 เฮิรตซ์



(ค) โครงสร้าง กว้าง 4 มิลลิเมตร x ยาว 15.8 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3189.7 เฮิรตซ์

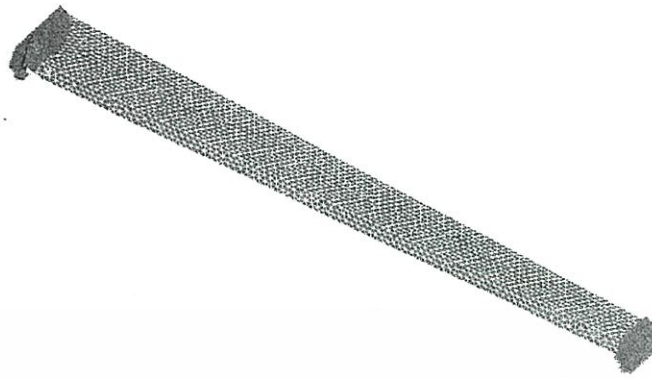


(ง) โครงสร้าง กว้าง 2 ถึง 4 มิลลิเมตร x ยาว 16 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3157.6 เฮิรตซ์  
รูปที่ 4.3.3 โครงสร้างรูปทรงต่างๆ ที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever

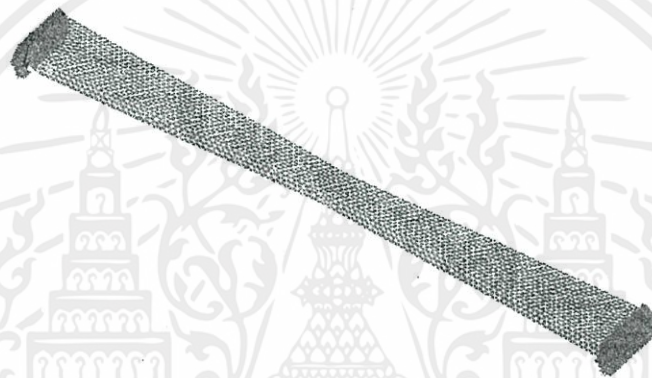
การที่จำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างหลายรูปแบบนั้น เป็นเพราะต้องการที่จะทราบว่ารูปทรงแบบใดสามารถทำให้วัสดุเพียงโซอิลเล็กทริกเกิดความเค้นสูงที่สุด หรือมีการกระจายของความเค้นมากที่สุด



เอกสารที่ ก) โครงสร้าง กว้าง 5 มิลลิเมตร x ยาว 40.5 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3189.7 เฮิรตซ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) โครงสร้าง กว้าง 6 ถึง 3 มิลลิเมตร x ยาว 40.5 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3156.2 เฮิร์ตซ์



ค) โครงสร้าง กว้าง 6 ถึง 3 มิลลิเมตร x ยาว 43 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3183.7 เฮิร์ตซ์

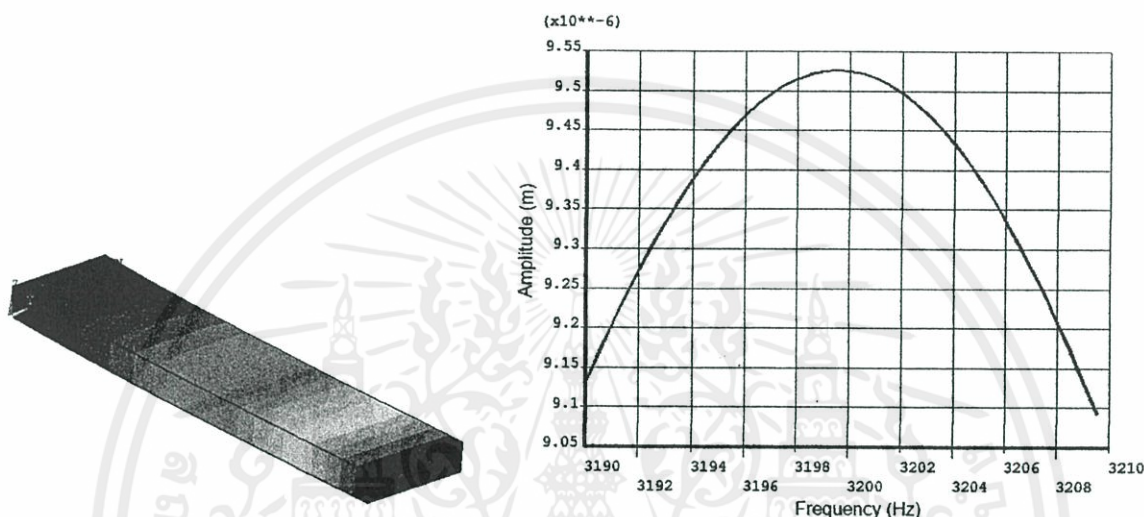


ง) โครงสร้าง กว้าง 4 ถึง 6 มิลลิเมตร x ยาว 39 มิลลิเมตร x หนา 1 มิลลิเมตร มีความถี่ 3197.9 เฮิร์ตซ์  
รูปที่ 4.3.4 โครงสร้างรูปทรงต่างๆ ที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge

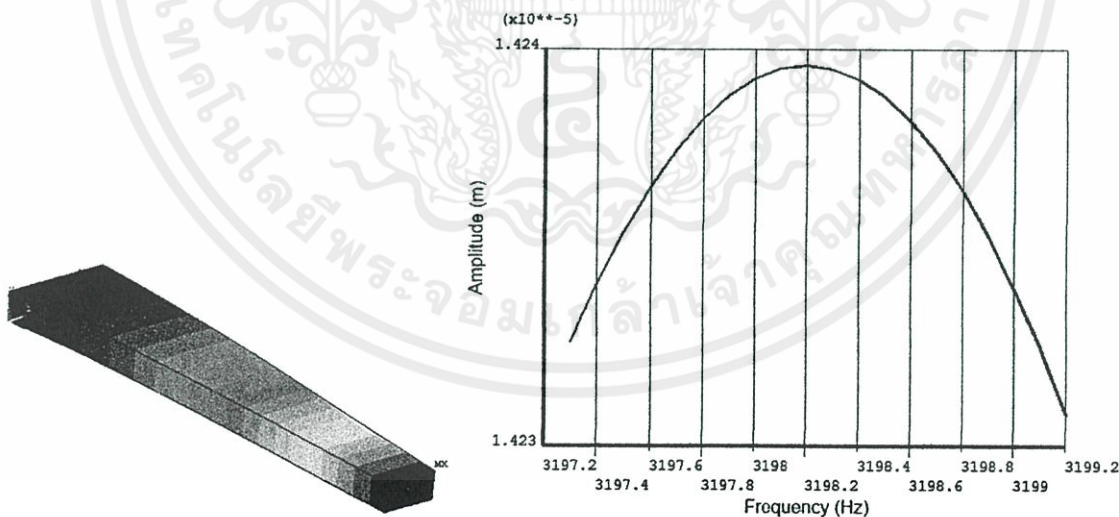
หลังจากที่ได้จำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ทำให้ทราบขนาดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่มีความความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน ซึ่งสามารถนำขนาด และความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้นไปจำลองหาการกำจัดสูงสุดตามหัวข้อ 3.2.4 ต่อไป

### 4.3.3 การกำจัดสูงสุดของโครงสร้าง ณ ความถี่เรโซแนนซ์

เมื่อทราบค่าความถี่เรโซแนนซ์ และขนาดของโครงสร้างในรูปทรงต่างๆ ตามหัวข้อ 4.3.2 แล้ว จึงทำให้สามารถหาค่าการกำจัดสูงสุด ณ ความถี่เรโซแนนซ์ได้ โดยการหาการกำจัดของโครงสร้างในรูป 4.3.3 หรือโครงสร้างรูปทรงต่างๆ ที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever นั้นจะต้องใส่แรงกระทำ ณ บริเวณที่คาดว่าจะมีการกำจัดสูงสุดในที่นี้คือบริเวณด้านตรงข้ามจากด้านที่ถูกยึด หรือด้านปลายนั่นเอง โดยจะได้การกำจัดสูงสุดดังรูป 4.3.5 หลังจากที่เราทราบการกำจัดแล้ว จึงนำค่าการกำจัดที่ได้ไปหาค่าความเค้นของโครงสร้างต่อไป

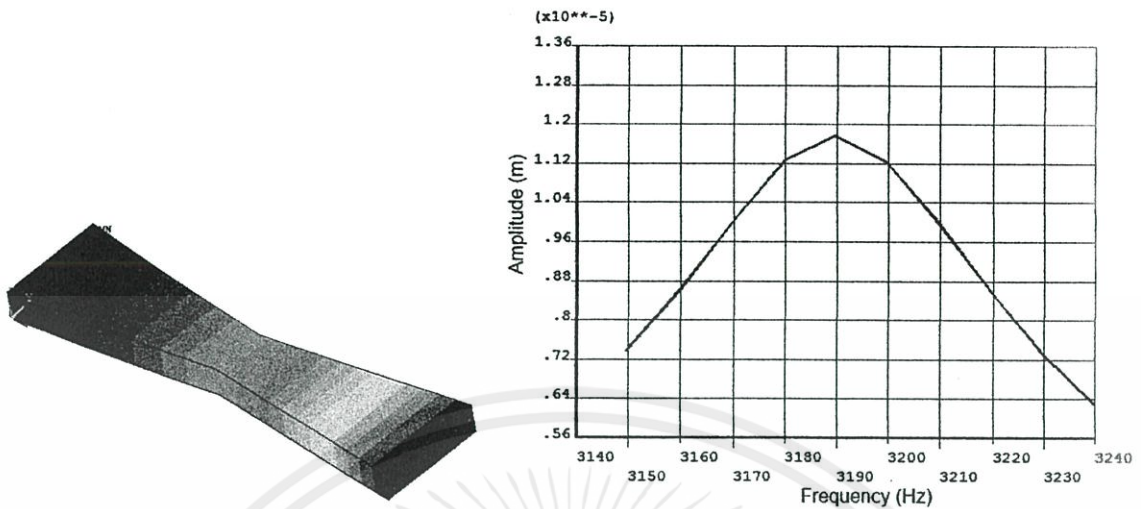


(ก) โครงสร้างในรูป 4.3.3 (ก) ได้การกำจัดสูงสุด 9.53 ไมครอน

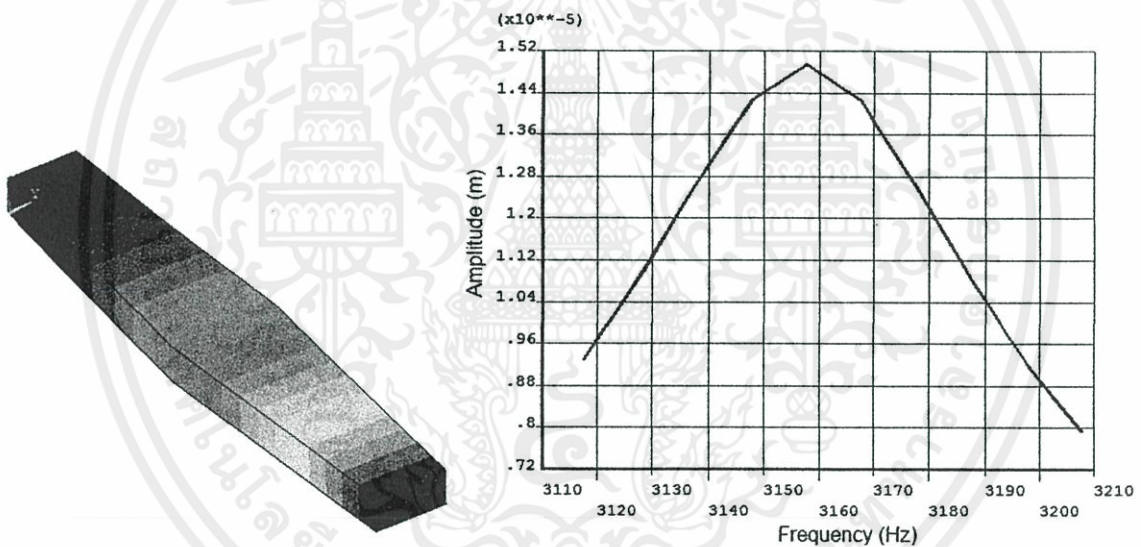


(ข) โครงสร้างในรูป 4.3.3 (ข) ได้การกำจัดสูงสุด 0.1424 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) โครงสร้างในรูป 4.3.3 (ค) ได้การก่้าจัดสูงสุด 0.12 ไมครอน

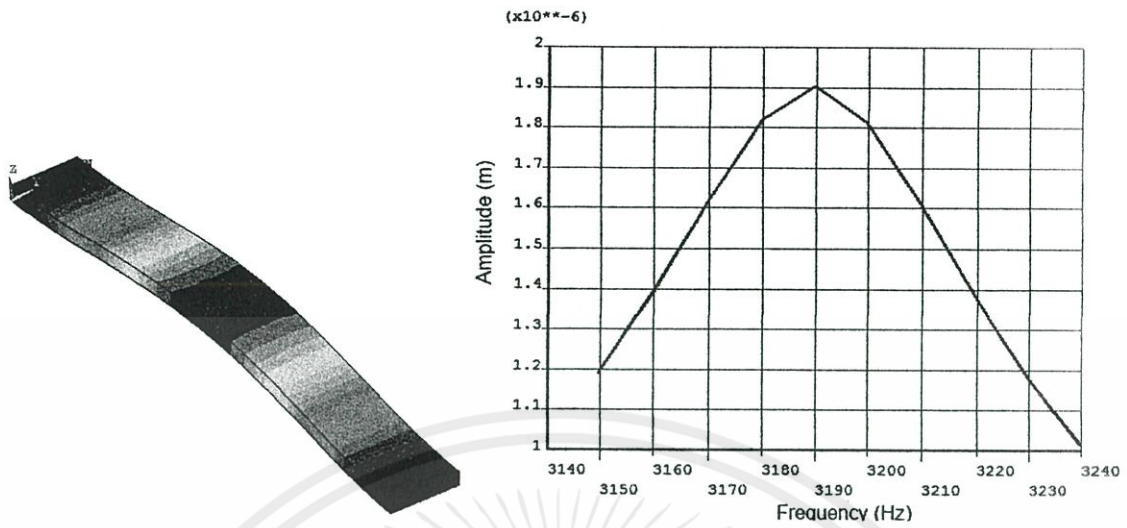


(ง) โครงสร้างในรูป 4.3.3 (ง) ได้การก่้าจัดสูงสุด 0.15 ไมครอน

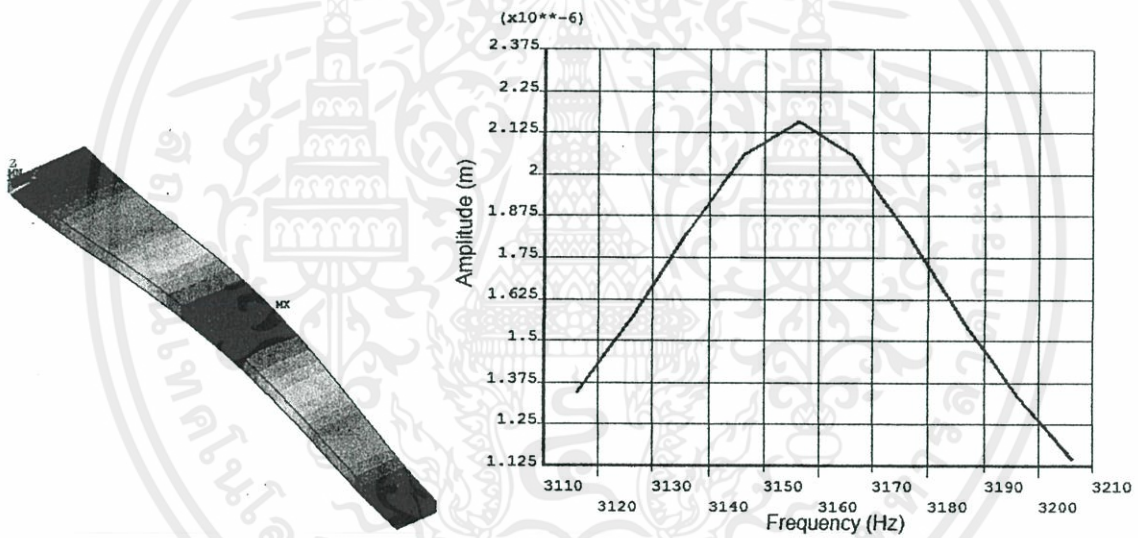
รูปที่ 4.3.5 กราฟแสดงการก่้าจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever

หลังจากที่ได้ค่าการก่้าจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever แล้ว สิ่งที่จะต้องทำต่อไปคือการหาค่าการก่้าจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge ดังรูป 4.3.6 แล้วจึงนำค่าการก่้าจัดของโครงสร้างทั้งหมดที่ได้ไปหาค่าความเค้น จากนั้นจึงเปรียบเทียบว่าโครงสร้างชนิดใดมีค่าความเค้นมากกว่ากัน หรือมีค่าความเค้นกระจายได้ทั่วถึงมากกว่ากันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

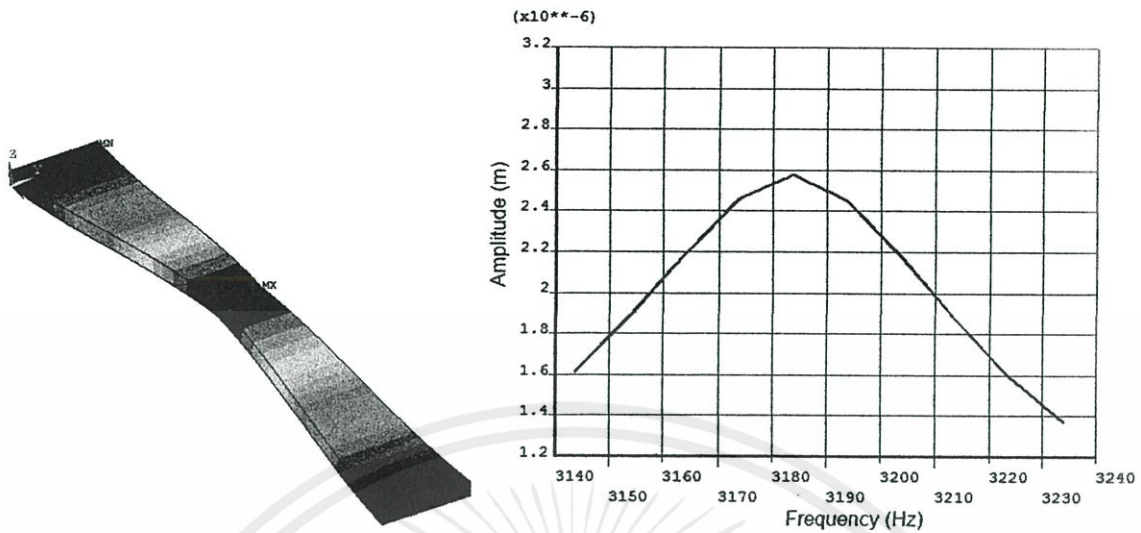


(ก) โครงสร้างในรูป 4.3.4 (ก) ได้การกำจัดสูงสุด 2 ไมครอน

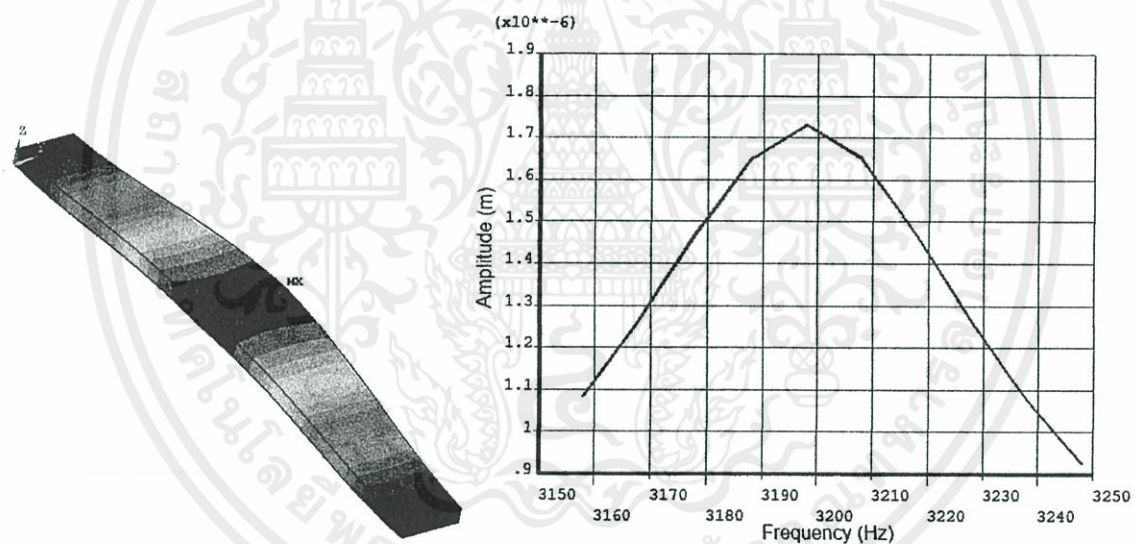


(ข) โครงสร้างในรูป 4.3.4 (ข) ได้การกำจัดสูงสุด 2.15 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) โครงสร้างในรูป 4.3.4 (ค) ได้การกำจัตสูงสุด 2.6 ไมครอน



(ง) โครงสร้างในรูป 4.3.4 (ง) ได้การกำจัตสูงสุด 1.75 ไมครอน  
รูปที่ 4.3.6 กราฟแสดงการกำจัตสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge

หลังจากที่ได้ค่าการกำจัตสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever และหาค่าการกำจัตสูงสุดของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge แล้ว จึงนำค่าการกำจัตของโครงสร้างทั้งหมดที่ได้ไปหาค่าความเค้น จากนั้นจึงเปรียบเทียบว่าโครงสร้างชนิดใดมีค่าความเค้นมากกว่ากัน หรือมีค่าความเค้นกระจายได้ทั่วถึงมากกว่ากัน ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ค่าความเค้นของโครงสร้างรูปทรงต่างๆ

หลังจากทราบค่าการกำจัดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างในรูปทรงต่างๆ ตามหัวข้อ 4.3.3 แล้ว จึงนำค่าการกำจัดนั้น ไปทดลองใส่ลงในโครงสร้างที่ได้ออกแบบมา ณ จุดเดียวกันกับจุดที่ใส่แรงดังหัวข้อที่ 3.2.5 เพื่อหาความเค้นของโครงสร้างที่ได้ออกแบบมานั้นข้างต้น แล้วนำโครงสร้างที่ออกแบบนั้นมาเปรียบเทียบค่าความเค้น หรือเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าความเค้น ดังรูป 4.3.7 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever และในรูปที่ 4.3.8 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge โดยการกระจายตัวของค่าความเค้นบนโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever นั้นจะมีการกระจายตัวของค่าความเค้นที่มากกว่าโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge อย่างเห็นได้ชัดเจน



(ก) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.3 (ก)



(ข) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.3 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.3 (ค)

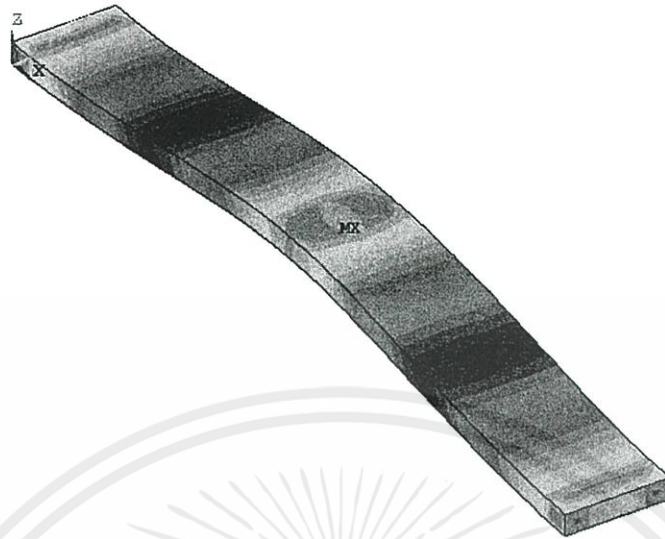


(ง) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.3 (ง)

**รูปที่ 4.3.7** ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever

จากรูปที่ 4.3.7 พบว่าค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นในโครงสร้างดังรูป 4.3.7 (ง) ที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever นั้นมีค่ามากกว่า ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างอื่นๆ ที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.4 (ก)



(ข) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.4 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.4 (ค)



(ง) ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างในรูป 4.3.4 (ง)

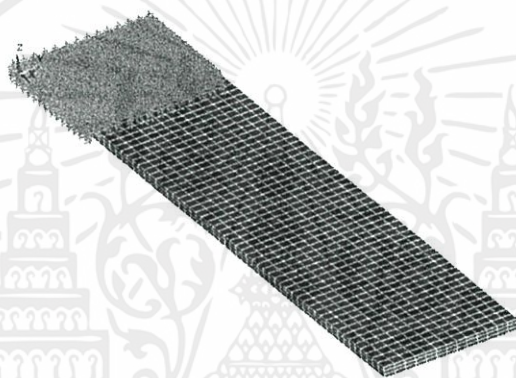
**รูปที่ 4.3.8** ค่าความเค้น และการกระจายตัวของความเค้นของโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge

จากรูปที่ 4.3.8 พบว่าค่าความเค้นบนโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Bridge นั้นมาค่ามากกว่าค่าความเค้นบนโครงสร้างที่ถูกยึดในรูปแบบ Cantilever แต่การกระจายตัวของความเค้นบนโครงสร้างนั้นมีการกระจายการรวมตัวของความเค้นอยู่เป็นส่วนใหญ่ไปทำให้ความเค้นมีไม่ทั่วทั้งโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

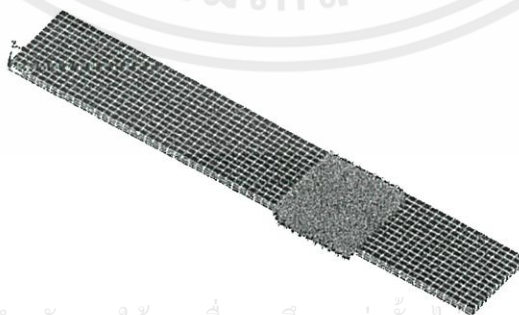
#### 4.3.5 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไปแล้ว แต่ในความเป็นจริงนั้น การจะสั่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่โครงสร้างพอดีกับ โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้ออกแบบไว้ในข้างต้นนั้น มีราคาที่สูง และใช้ระยะเวลาในการตัดนาน เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำเร็จรูปที่ติดมากับวัสดุอื่นอยู่แล้วดังรูปที่ 3.16 แถมยังไม่สามารถเลือกขนาดได้ตามต้องการ อีกทั้งยังไม่สามารถเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างได้ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษา คุณสมบัติทุกอย่างของโครงสร้างใหม่ โดยที่จากข้อมูลที่ให้มานั้นค่าความถี่ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป ณ ระยะเวลาสั้น 25.4 มิลลิเมตรมีความถี่ 320 เฮิร์ตซ์ ดังรูป 4.3.9 จากการที่ทราบค่าความถี่ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปแล้ว ก็จึงจะสามารถทดลองเปลี่ยนค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปต่อไปได้



รูปที่ 4.3.9 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป กว้าง 6.4 มิลลิเมตร x ยาว 31.8 มิลลิเมตร x ทน 51 มิลลิเมตร ทำการยึดให้โครงสร้างสั้นที่ระยะความยาว 25.4 ได้ความถี่ 320 เฮิร์ตซ์

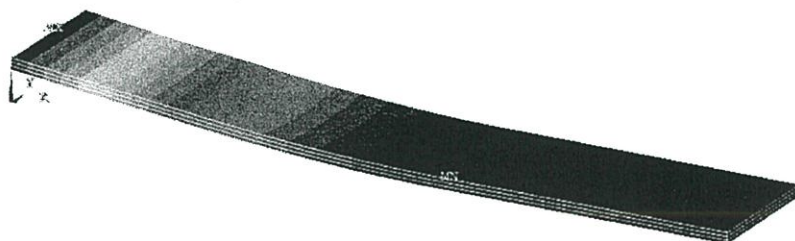
โครงสร้างดังรูป 4.3.9 นั้นสามารถนำมาเปลี่ยนความถี่ได้โดยการเปลี่ยนบริเวณของการยึดโครงสร้าง และการเพิ่มมวลถ่วงน้ำหนักดังหัวข้อที่ 3.2.3 ได้ ซึ่งได้ผลการทดลองการเปลี่ยนค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูป ให้ตรงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานได้ ดังรูป 4.3.10 แล้วจึงนำข้อมูลการยึดโครงสร้างที่ได้ไปปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปตัวจริงต่อไป



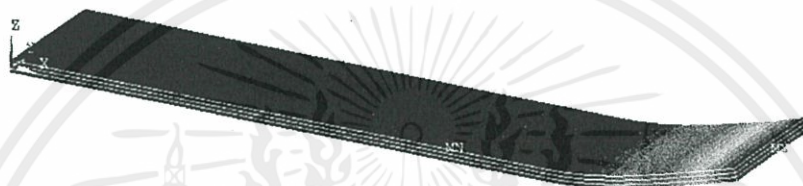
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อที่ปรึกษา

(ก) เลือกตำแหน่งที่จะยึดโครงสร้างห่างจากปลายด้านหนึ่งยาว 18.5 มิลลิเมตร แล้วจึงยึดโครงสร้างด้วยความยาว 5 มิลลิเมตร



(ข) ด้านยาวมีความถี่ 600 เฮิร์ตซ์



(ค) ด้านสั้นมีความถี่ 3000 เฮิร์ตซ์

รูปที่ 4.3.10 ผลการเปลี่ยนความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างโดยการยึดโครงสร้าง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองโครงสร้างให้มีความถี่เรโซแนนซ์ 2 ช่วงแล้วจึงนำผลที่ได้ไปทดลองทำการยึดโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปจริงโดยใช้โครงสร้างในรูปที่ 3.20 เพื่อทำการยึดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานสำเร็จรูปต่อไป

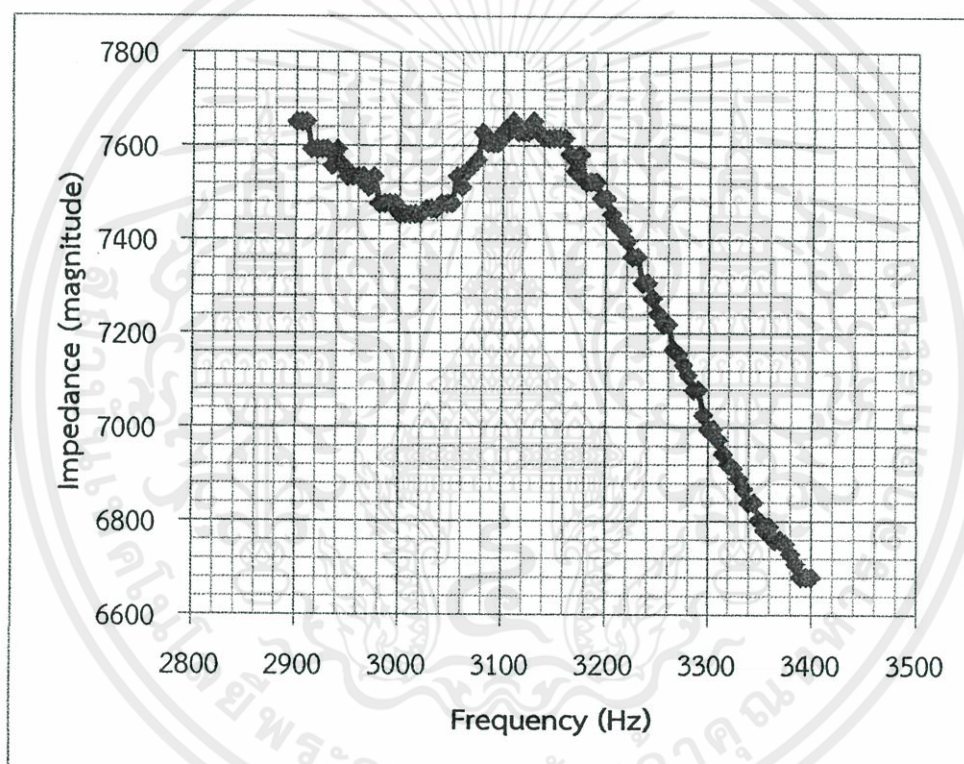
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

การทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น เมื่อออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในหัวข้อที่ 4.3 แล้ว จึงทำการออกแบบตัววัดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานดังที่ได้จำลองการยึดในแบบต่างๆ จากนั้นจึงนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้ไปทดสอบหาความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้ทำให้อุปกรณ์กำเนิดพลังงานมีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของถนนที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2

##### 4.4.1 ผลการทดสอบหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

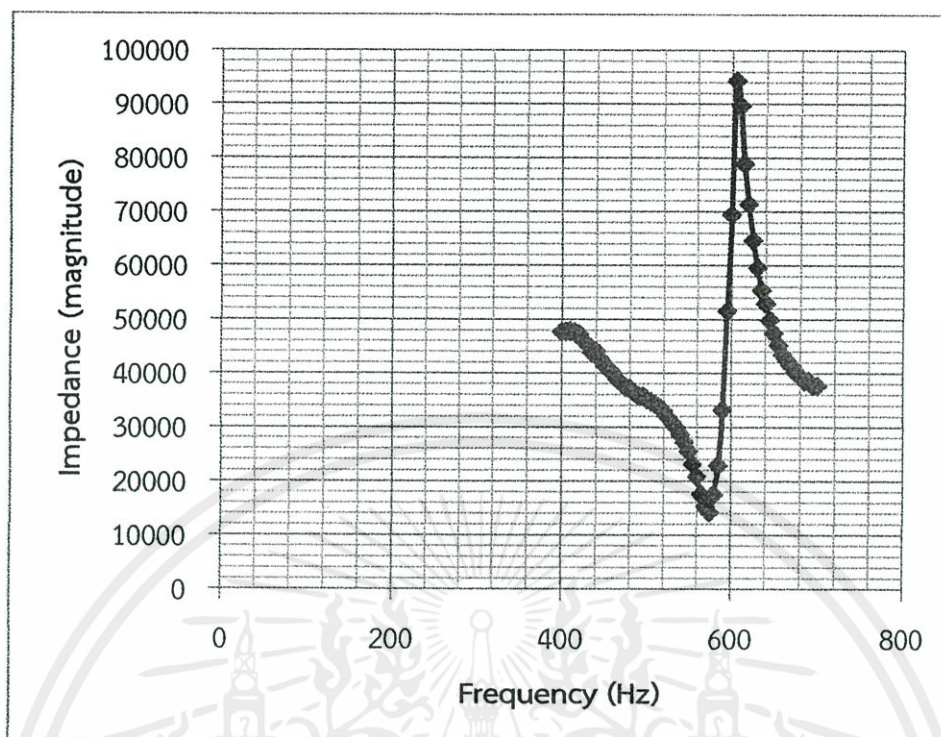
จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน ในหัวข้อที่ 3.3.1 ได้ทำการหาค่าความถี่เพื่อปรับค่าความถี่ของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานให้ได้ 3050Hz และ 600Hz เนื่องจากความถี่ค่านี้เป็นความถี่ที่มีการพบมากที่สุดในการทดลองหาความถี่ของสะพาน ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.4.1 กราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์

จากรูปที่ รูปที่ 4.4.1 เป็นผลการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ ซึ่งในกรณีนี้ความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์มีค่าเท่ากับ 3050Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

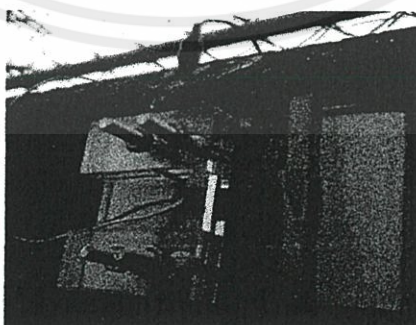


รูปที่ 4.4.2 กราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์

จากรูปที่ 4.4.2 เป็นผลการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ ซึ่งในกรณีนี้ความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์มีค่าเท่ากับ 600Hz แต่เมื่อนำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานที่ได้ออกแบบไปทำการติดตั้งพบว่า อุปกรณ์ไม่สามารถให้พลังงานได้เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดต่ำเกินไป

#### 4.4.2 ผลการเปรียบเทียบความถี่ของอุปกรณ์และความถี่ของสะพาน

จากหัวข้อที่ 4.1.1 อุปกรณ์ไม่สามารถกำเนิดพลังงานได้ จึงได้ทดลองติดตามผลดังในหัวข้อ 3.2.3.2 การติดตาม ณ จุดที่เกิดการก่อกำจัดสูงสุด อุปกรณ์จะให้พลังงานสูงสุดก็ต่อเมื่อการสั่นมีแอมพลิจูดที่สูงที่สุด ซึ่งการสั่นที่แอมพลิจูดสูงนี้จะพบในความถี่ที่ต่ำดังในหัวข้อที่ 4.2.2 เมื่อมีรถที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่าน จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ให้ยาวที่สุดในรูปที่ 4.4.3 และติดตามที่มีน้ำหนัก 10 กรัมจะให้พลังงานมากที่สุด

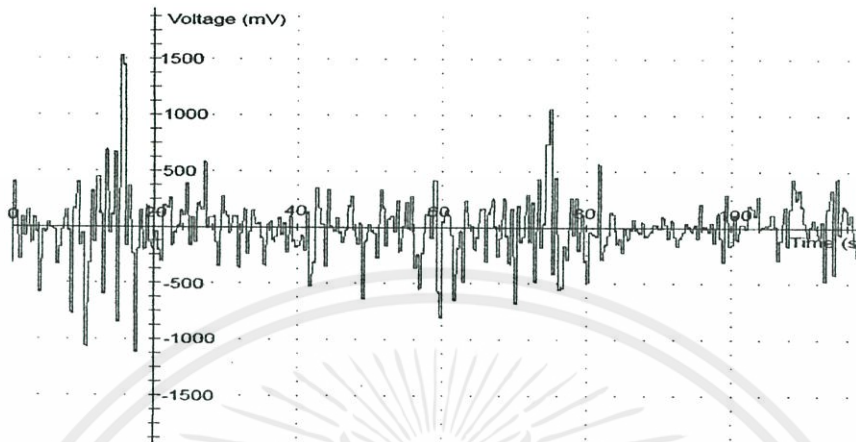


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... เติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

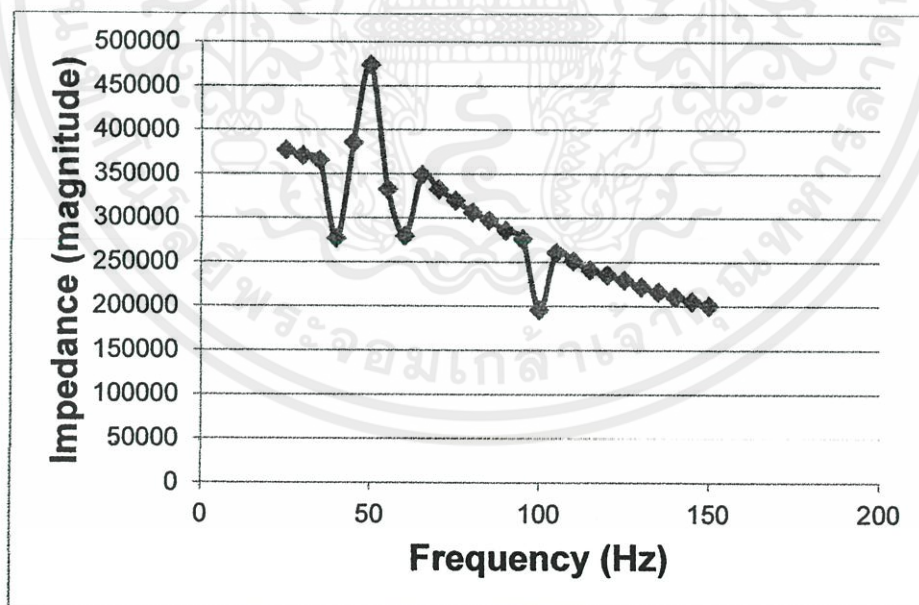
รูปที่ 4.4.3 อุปกรณ์กำเนิดพลังงานเมื่อทำการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุดและติดตาม 10 กรัม

จากการทดลองเมื่อติดมวล 10 กรัมและทำการยัดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุดจะได้แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.4.4



รูปที่ 4.4.4 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลาเมื่อทำการยัดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุดและติดมวล 10 กรัม

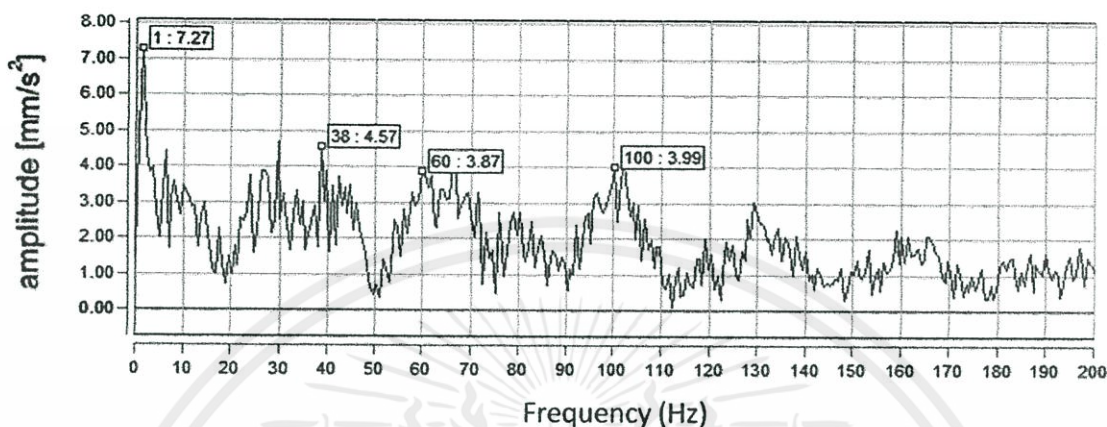
เมื่อทำการยัดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุดและติดมวลแล้วพบว่า ความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ นั้นเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีความถี่ต่ำมากจากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ในรูปที่ 4.4.5



รูปที่ 4.4.5 กราฟอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในชื่อการค้าของหน่วยงานของรัฐหรือเอกชนด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4.5 พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์มีค่าความถี่ประมาณ 40Hz , 60Hz และ 100Hz ซึ่งตรงกับการทดลองวัดความถี่ของสะพาน ซึ่งเมื่อรถที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่าน จะทำให้เกิดความถี่ที่ต่ำมาก และมีแอมพลิจูดที่สูงจะให้พลังงานมากที่สุด ดังรูป 4.4.6

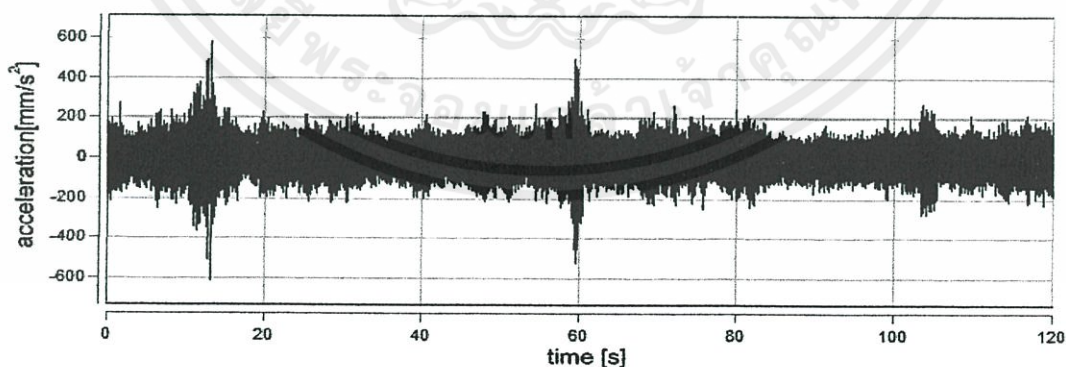


รูปที่ 4.4.6 กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่

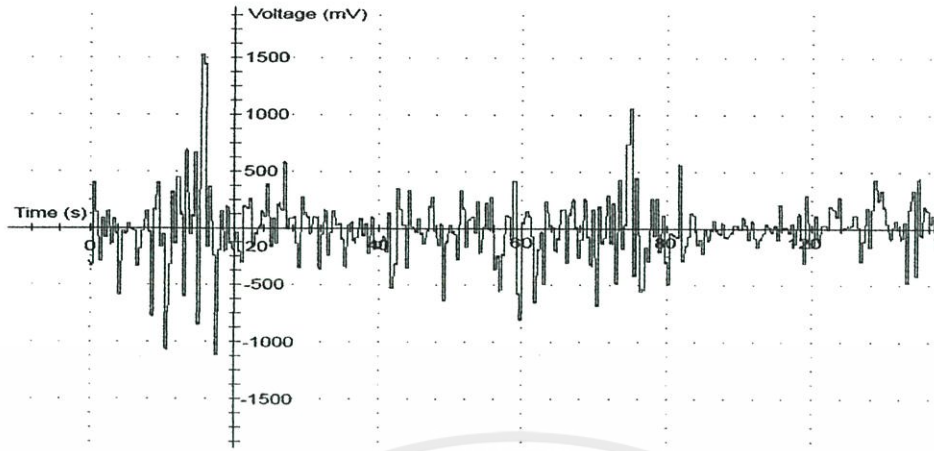
จากผลการทดลองนี้ อุปกรณ์กำเนิดพลังงานจะให้แรงดันสูงเมื่อสะพานมีการสั่นในความถี่ที่ต่ำและต้องทำการปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ให้มีค่าที่ต่ำและตรงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานด้วย

#### 4.4.3 ผลการทดสอบวัดพลังงานจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากที่ปรับความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยทำการยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุดและติดมวล 10 กรัม ขึ้นต่อไปคือการนำอุปกรณ์ไปติดตั้งบนสะพาน แล้วจึงนำ Oscilloscope ในหัวข้อที่ 2.5 ไปวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและนำมาเปรียบเทียบกับความถี่ของการสั่นของสะพานซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

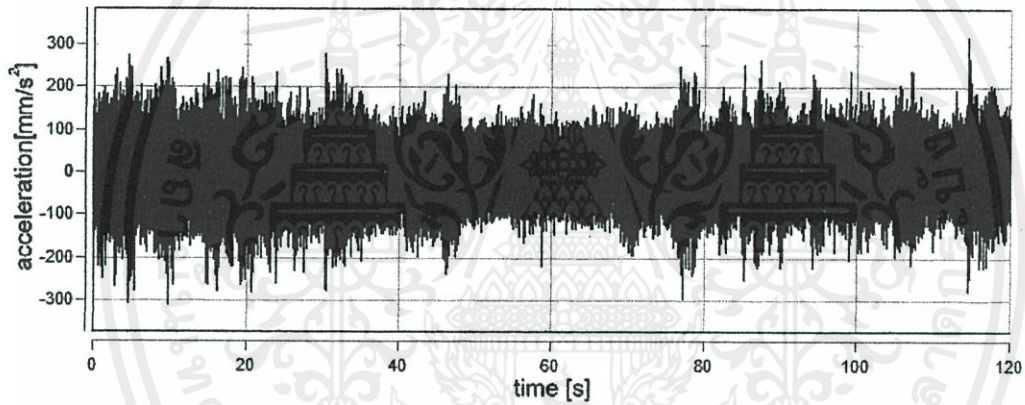


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ก) กราฟแสดงความเร็วเทียบกับเวลา อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

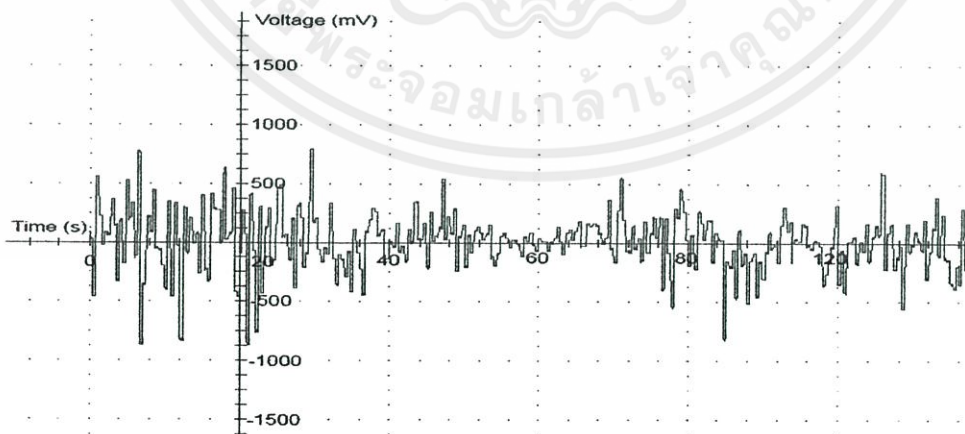


(ข) กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา

รูปที่ 4.4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร่งในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดลองครั้งที่ 1



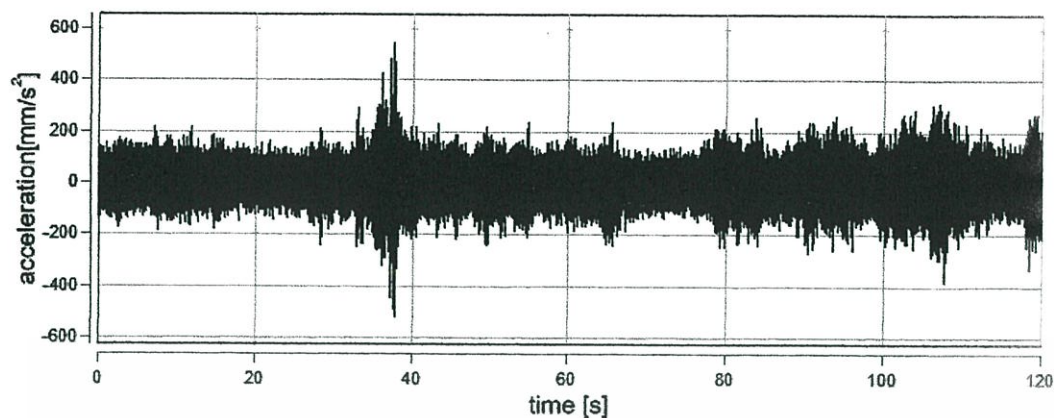
(ก) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลา



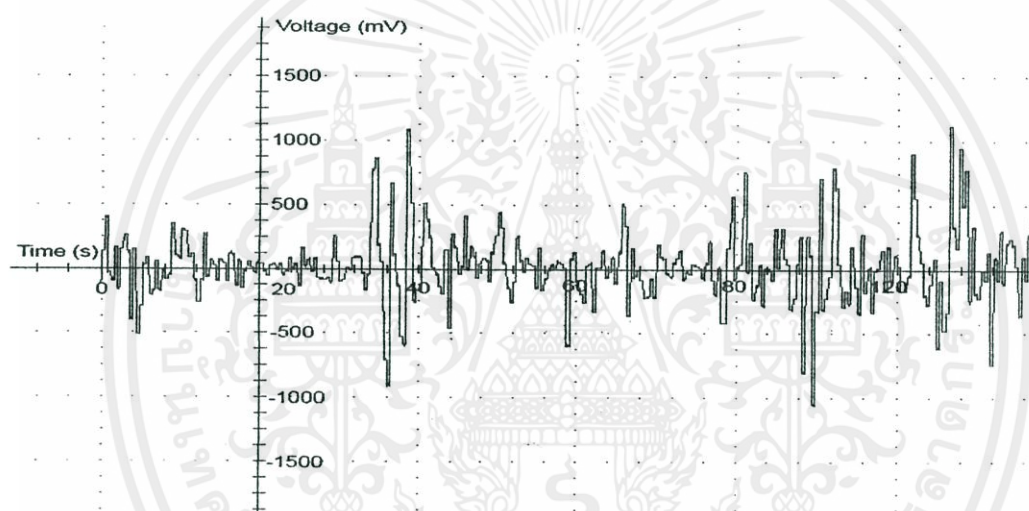
(ข) กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา

รูปที่ 4.4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร่งในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาหรือข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลา



(ข) กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา

รูปที่ 4.4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร่งในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดลองครั้งที่ 3

จากผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร่งในการสั่นของสะพานกับแรงดันไฟฟ้า จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้งพบว่ามีความใกล้เคียงกัน จากหัวข้อที่ 4.2.2 เมื่อรถที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่านเช่น รถบรรทุก การสั่นของสะพานจะมีแอมพลิจูดที่สูงและแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าที่สูงที่สุด จากกราฟกราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลาทั้ง 3 การทดลอง จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า ประมาณ 3 โวลต์ยอดถึงยอด เนื่องจากมีรถที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานจากการสั่นของสะพาน ผลการทดลองอุปกรณ์กำเนิดพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถกำเนิดแรงดันไฟฟ้าได้จริง โดยทำการทดลองติดตั้งที่สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อรถวิ่งผ่านทำให้เกิดการสั่นของสะพานด้วยความถี่หลายค่า แต่ความถี่ที่สามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดคือความถี่ที่ต่ำได้แก่ ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ 60 เฮิร์ตซ์ และ 100 เฮิร์ตซ์ โดยต้องทำการปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์ให้ตรงกับค่าความถี่ดังกล่าว ซึ่งการทดลองใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพียง 1 ตัวสามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุดเมื่อรถที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุกวิ่งผ่าน 3 โวลต์จากยอถึงยอ แต่จะให้แรงดันไฟฟ้าเมื่อสะพานไม่มีรถวิ่งผ่าน หรือ มีรถน้ำหนักเบาวิ่งผ่านประมาณ 1 โวลต์ยอถึงยอ แต่เมื่อทำการเก็บพลังงานในวงจรเก็บพลังงานไม่สามารถทำได้เนื่องจากอินพุตนั้นไม่คงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่พอที่จะเก็บพลังงานไว้ในวงจรเก็บพลังงาน

### 5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

จากการทำโครงการนี้ ปัญหาที่พบคือ การทดลองเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของการสั่นของสะพานนั้น ได้ค่าความถี่ออกมาหลายค่า ซึ่งไม่รู้ว่าความถี่ทั้งหมดนี้เกิดขึ้นจากสาเหตุใดทำให้ต้องใช้เวลานานในการวิเคราะห์เพื่อแยกค่าความถี่ เมื่อแยกความถี่แล้ว ถึมนำความถี่ที่ได้ทำการเลือกไปปรับค่าความถี่ของอุปกรณ์ให้ตรงกัน แต่เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นเมื่อทำการยึดแล้วค่าความถี่เรโซแนนซ์ไม่ตรงกับการออกแบบในโปรแกรม ANSYS จึงทำให้ต้องใช้เวลานานและทำการทดลองหลายครั้งเพื่อที่จะหาตำแหน่งที่จะยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้มีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับสะพาน จากนั้นนำอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไปทำการติดตั้งจริงพบว่าอุปกรณ์กำเนิดพลังงานนั้นเกิดแรงดันที่น้อยเกินไป

สำหรับแนวทางการแก้ไขนั้น ได้ทำการบันทึกวิดีโอในขณะที่ทำการทดลองวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานเพื่อจะนำมาแยกความถี่โดยดูจากวิดีโอที่ทำการบันทึกและดูแอมพลิจูดของกราฟความเร่งเทียบกับเวลา ปัญหาในการปรับค่าความถี่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นได้แก้ไขจากทฤษฎีการหาค่าอิมพีแดนซ์ หลังจากนั้นจึงได้ทำการติดมวลขนาด 10 กรัมและยึดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ยาวที่สุด เพื่อทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดที่สูงทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วยเมื่อนำไปติดตั้งจริง และจึงทำการวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ใหม่อีกครั้งทำให้สามารถปรับค่าความถี่ของอุปกรณ์ให้ตรงกับสะพานได้ อุปกรณ์กำเนิดพลังงานจึงสามารถให้แรงดันได้มากขึ้น

### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

จากการสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานจากการสั่นของสะพาน โดยสะพานที่ได้เลือกนั้นมีการสั่นที่แอมพลิจูดที่ต่ำเกินไป ทั้งนี้ควรทำการติดตั้งที่สะพานใหญ่ที่มีรวิ้งผ่านเป็นจำนวนมาก หรือสะพานที่มีการสั่นมากๆ เช่น สะพานแขวน จากการที่ทดลองใช้วัสดุเพียโซอิเล็กตริกนั้นได้ทำการออกแบบใช้วัสดุเพียงตัวเดียว ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าน้อยเกินไป ควรศึกษาข้อมูลทฤษฎีของวัสดุเพียโซอิเล็กตริกมากขึ้นหรือทำการเพิ่มจำนวนของวัสดุเพียโซอิเล็กตริกมากขึ้น

เมื่อทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulate) แล้ว ควรทำการทดลองอย่างละเอียดเพราะบางทีผลการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulate) อาจคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากเนื่องจากมีตัวแปรหลายอย่างทางธรรมชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



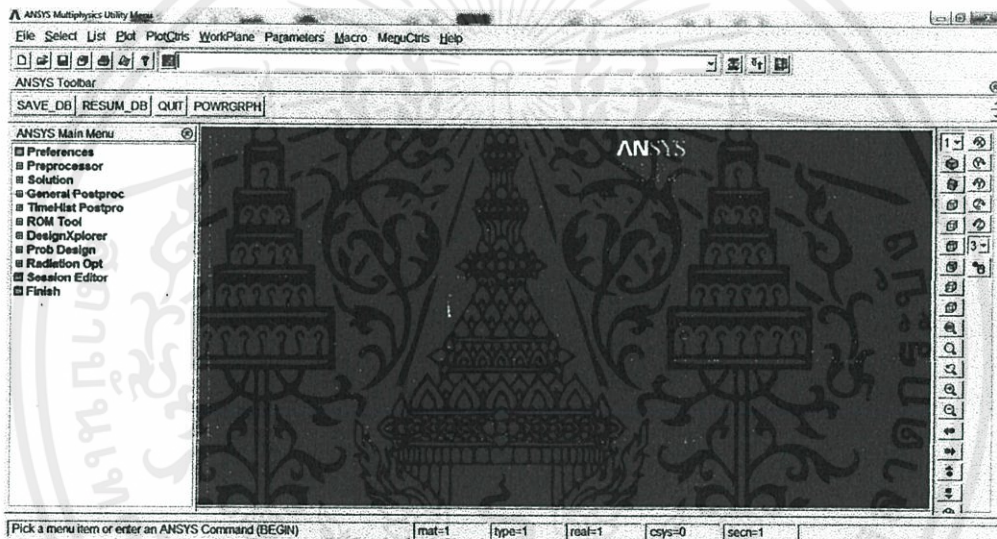
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## โปรแกรมการประมวลผลภาพและโปรแกรมควบคุม

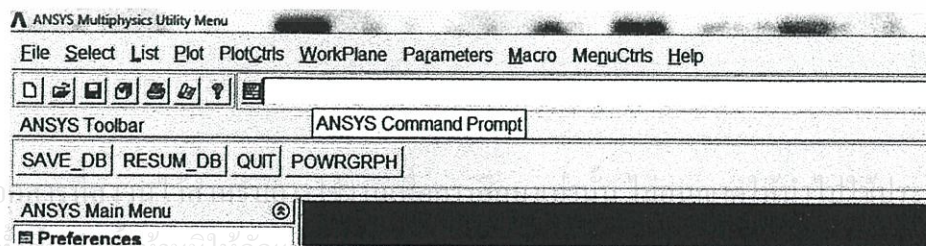
## ก.1 โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0

โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 ดังรูป ก.1 นั้นใช้ในการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และใช้ในการคำนวณ ค่าความถี่, ค่าการก้ำกัจัดสูงสุด ณ ความถี่เรโซแนนซ์ และค่าความเค้นของโครงสร้างต่างๆ



รูปที่ ก.1 โปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0

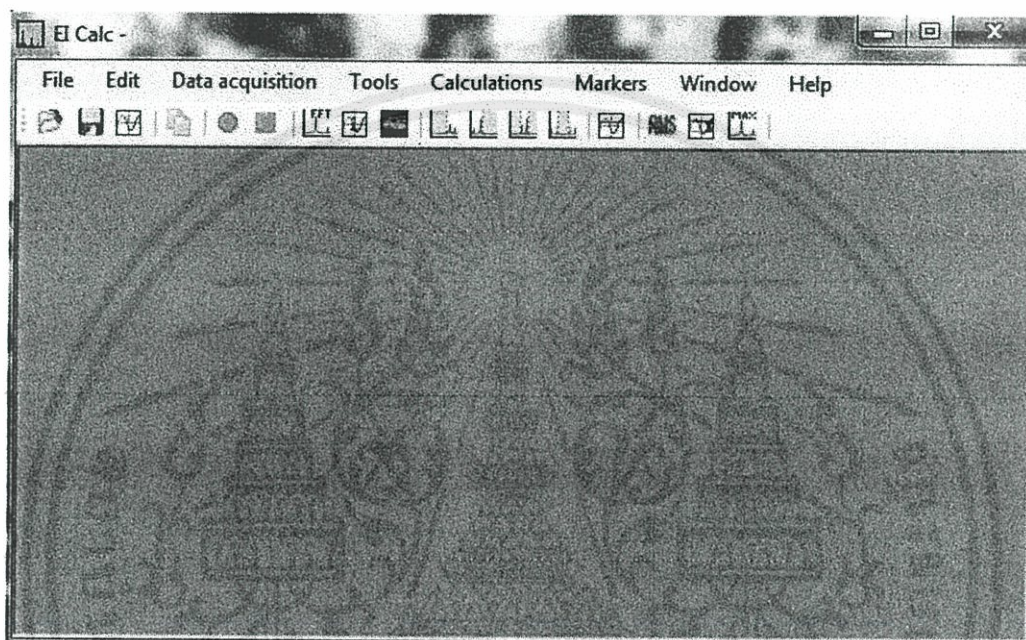
ในส่วนการใช้งานโปรแกรม Mechanical APDL (ANSYS) 14.0 นั้นสามารถทำได้โดยการ ป้อนคำสั่งการใช้งานต่างๆ เข้าไปในช่อง ANSYS Command Prompt ดังรูปที่ ก.2



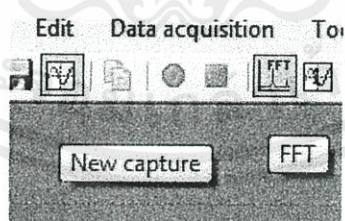
รูปที่ ก.2 ช่อง ANSYS Command Prompt

## ก.2 โปรแกรม Ei-Calc

โปรแกรม Ei-Calc ดังรูป ก.3 เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคู่กับ เครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) ดังหัวข้อที่ 2.4 สามารถวัดอัตราเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ โดยใช้คำสั่ง New Capture ดังรูป ก.4 แล้วยังสามารถนำกราฟอัตราเร่งที่วัดมาได้นำไปแปลง Fast Fourier Transform โดนใช้คำสั่ง FFT ดังรูป ก.4 เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวัตถุต่างๆ ได้



รูปที่ ก.3 โปรแกรม Ei-Calc

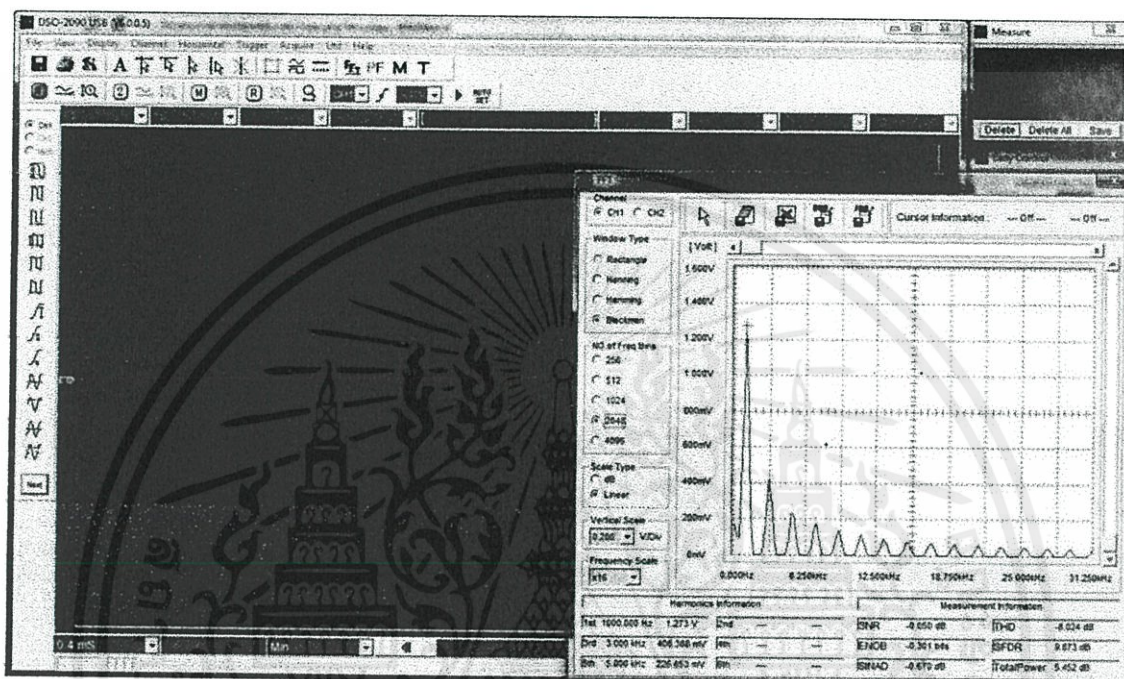


รูปที่ ก.4 คำสั่ง New Capture และคำสั่ง FFT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.3 โปรแกรม DSO-2090 USB

โปรแกรม DSO-2090 USB ดังรูป ก.5 เป็นโปรแกรมที่ใช้คู่กับ ออสซิลโลสโคปของบริษัท Hantek รุ่น DSO-2090 ดังรูป 2.8



รูปที่ ก.5 Software DSO-2090 USB ซึ่งใช้คู่กับออสซิลโลสโคปของบริษัท Hantek รุ่น DSO-2090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## เอกสารคู่มืออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและเครื่องมือวัด

## ข.1 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน



**PIEZO SYSTEMS, INC.**

65 Tower Office Park

Woburn, MA 01891

Tel (781) 933-4850 • Fax (781) 933-4741

**Material Safety Data Sheet (MSDS)**

**PSI-5A4E Piezoceramic Material**

**Company Name:** Piezo Systems, Inc.  
**Address:** 65 Tower Office Park  
 Woburn, Massachusetts 01801 USA  
**Information Telephone Number:** (781) 933-4850  
**Emergency Telephone Number:** (781) 933-4743 (ask for Safety Director)

**Identification:**

**Chemical Family:** Ceramic Materials  
**Formula:** Proprietary

**Physical Data:**

**Form:** Solid Ceramic Material  
**Appearance:** Yellow - White  
**Odor:** None  
**Solubility in Water:** Insoluble

**Components:**

Material	Percent %	CAS #
Lead Oxide	60-70	1306-60-0
Zirconium Oxide	20-25	1314-23-4
Titanium Oxide	10-15	13463-67-7
Lanthanum Oxide	2-4	1312-81-8

**Hazards/Reactivity:**

**Instability:** This product is normally stable  
**Incompatibility:** None  
**Polymerization:** This product does not normally polymerize significantly

**Fire & Explosion Data:**

**Flash Point:** None; solid material  
**Fire & Explosion Hazards:** None, nonflammable

**Health Hazard Information:**

The primary route of entry is either by inhalation or ingestion. This material can be in the form of a powder or solid. If inhaled or ingested the toxicology of lead predominates. This includes the potential for damage to the kidneys, blood forming organs as well as the reproductive system and the nervous system. Ingestion can cause vomiting, diarrhea, nausea and abdominal pain. Inhalation may cause irritation of the nose and throat, cough, dyspnea, chest pains, fever and chills.

**Material Safety Data Sheet (MSDS)**

PSI-5A4E Piezoceramic Material

Acute lead poisoning can lead to a condition called acute encephalopathy, which may rapidly develop into seizures, coma and eventually death.

**Exposure Limits:**

<u>Material Name:</u>	<u>OSHA PEL (mg/m3)</u>	<u>ACGIH TLV (mg/m3)</u>
Lead	0.05	0.05
Zirconium	5.0	5.0
Titanium	15.0 (respirable dust)	10.0
Lanthanum	15.0 (respirable dust)	10.0

**First Aid Instructions:**

Ingestion: If conscious, induce vomiting.  
 Inhalation: Remove to fresh air and if breathing is difficult give oxygen.  
 Skin Contact: Wash thoroughly.  
 Eye Contact: Flush with plenty of water for 15 minutes.  
 In all cases seek appropriate medical advice & treatment.

**Personal Protection Information:**

**Respiratory Protection:** Selection of a suitable respirator will depend on the properties of the contaminant(s) and their actual or expected air concentration(s) versus applicable limits. Consult ANSI Standard Z88.2 for decision logic to select appropriate NIOSH/MSHA approved respirators. If respirators are needed to meet applicable limits a respiratory protection program in accordance with OSHA Standard 29 CFR 1910.134 is mandatory. This includes monitoring, selection, medical approval, training, fit testing, inspection, maintenance, storage, etc.

**Gloves:** Gloves should be used when the possibility of skin contact exists. The suitability of a particular glove and glove material should be determined as part of an overall glove personal protection program. Considerations should include chemical breakthrough time, permeation rate; abrasion, cut and puncture resistance; and duration of contact, etc. Recommended glove material: Latex.

**Other personal protection practices:** Appropriate eye protection such as safety glasses should be used where the possibility of eye contact exists. Protective outer clothing should be used where the possibility of body contact exists. Contaminated work clothing should not be allowed out of the workplace. Smoking or the consumption of food or beverages should be prohibited where the material is handled or stored. After handling this material wash hands thoroughly before leaving the work area.

**Additional Engineering Controls:** Local exhaust ventilation is recommended where an airborne dust or powder is generated. Work practices and training may be required depending on the exposure level. Many of these points are discussed in the OSHA Respiratory Protection Standard (29 CFR 1910.134), the OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200) and the OSHA Lead Standard (29 CFR 910.1025).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Material Safety Data Sheet (MSDS)****PSI-5A4E Piezoceramic Material****Disposal Information:**

Contaminated items: Empty product containers, contaminated clothing and cleaning materials, etc. should be considered hazardous until decontaminated or properly disposed of. Dispose of waste in accordance with federal, state and local regulations. Typically defined as a hazardous waste by EPA.

**Storage Information:**

Store in tightly closed containers. Label with name of contents and hazard warnings.

**Regulatory Information:**

This material is listed on EPA's TSCA inventory. Lead is regulated under EPA's SARA Regulations.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 ออสซิลโลสโคป

DSO-2090 USB Manual

### Certificate of Product Warranty

This product's warranty, provided by our company, covers a period of 1 year from the date of purchase. All faulty parts and/or functions, resulting despite user's normal use, will be repaired and/or replaced at no charge during the warranty period.

However, if any of the malfunctions are caused by user carelessness, inadequate maintenance, or natural disaster, we will provide repair and/or replacement services for a fee regardless of warranty period.

In the event our product does not prove suitable for your application you can return the product for an exchange or refund. To claim, the product must be returned in good condition within 14 days. Before returning a product, please contact and provide us a serial number. The customer is responsible for all shipping costs.

Products covered by this warranty are limited to those that are registered at the We headquarter or branch offices and repairs, replacements, or refunds will be issued according to manufacturer's discretion. When in need of warranty services, the purchaser may visit our headquarter or one of our sales offices with the product or send the product with a detailed description of services required via postal service to any of our sales offices (the purchaser will be responsible for packaging, postage, and any postal insurance). Once repair services are completed, the supplier will return the product to the purchaser (return postage will be paid by the supplier).

However, if we determined required services to be outside the boundaries of the warranty coverage, we will first contact the purchaser and provide an estimate of repair costs and obtain authorization to conduct services before any work is done. In such a case, return postage along with the repair costs will be billed to the purchaser when the repaired product is returned.

We do not warrant that the software and the product with which it was supplied are completely error free or that will function correctly in all operating environments. It is essential that you, the users, should verify that the software

1

DSO-2090 USB Manual

and product are functioning to your requirements before relying caused on them or the data that they generate. We do not accept responsibility for any loss or injury caused by the use of the product or software. It is the user's responsibility to ensure that the product is suitable for the user's application.

We will not be held legally for any malfunction resulting from user carelessness, abnormal use, and/or natural disaster. Even if we are in receipt of prior notification of such dangers, we will not be held legally liable.

### Product Warranty Guide

Please read through the "Precautions for Safety" carefully to obtain a long and safe use of this product.

This product has been processed through careful quality control and testing procedures. Any malfunctions occurring during normal use are covered under the guidelines of the "Certificate of Product Warranty", which is included in this Manual.

If you experience product malfunction, please contact our headquarters or any of our sales offices.

2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DSO-2090 USB Manual

## Precautions for Safety

The following instructions are provided for safe and correct use of the product and to prevent a potentially dangerous situation or damage in advance. Be sure to read through them before you use the product.

## Recommended Usage Environment

- The ambient temperature and relative humidity should be 0-40°C and 10-80% respective for the normal operation of the product.

## Power Source

- The USB terminal and DSO-2090 USB are connected via a USB cable for DC +5V power from the PC. The product does not require an outside power source.

## Warning: Be careful not to input excessive power voltage

- The product's input power capacity is fixed as shown below to prevent electric shock and/or fire. Please DO NOT use voltage higher than that prescribed below.  
(Warning) Be sure to check the probe attenuation before measuring the voltage. The voltage that is higher than the maximum input voltage can cause damage to the device and you. In particular, there is the risk of an electric shock when measuring high voltage. So you need to pay extra attention not to have your hand touch the terminal.
- Please eliminate all unused probes or test leads so that they do not come in contact with surrounding high voltage parts.
- Make sure that the PC's power source is grounded.

3

## DSO-2090 USB Manual

## Maintenance and Storage

- If not using it for a long term, remove the USB cable from the product.
- The recommended temperature and humidity for equipment storage is 25°C at 50% humidity.

## After Service

- There are no parts that you can replace inside the product. Do not attempt replacing a part yourself. It can give you an electric shock.
- Do not attempt to open the case or repair yourself. It can cause an electric shock or other safety accidents.
- Once you open the case, you cannot have the privilege of an after-sales service.

## Minimum System Requirements

To install and run DSO-2090 USB, you should have the following.

## Operating System

Windows 98/ME/2000/XP/VISTA

## Memory

128Mbyte

## Graphic Card

Microsoft DirectX supported

Screen resolution: 800x600

Color depth: 16bit

## DSO-2090 USB Manual

## Handling Precautions

- The probe ground lead is at ground potential. Do not connect the ground lead to an elevated voltage. Connect the ground lead of the probe to earth ground only.  
If measuring the floating potential, we will recommend the measurement by the differential motion method using CH1 and CH2.
- Do not connect or disconnect the product with the probe or test lead which is connected to a voltage source.
- Do not attempt to operate the product at the situation that a risk of dysfunction or shock expected to happen.
- Stop using the product immediately when you notice something unusual about the smell, smoke or sound.  
And then remove the USB connection form your computer.
- Keep the product out of the reach of children or those who cannot be trusted with the use.
- Do not use the product with your hands wet. It can cause an electric shock.
- Do not try the product for the purposes other than those stated.

## Usage Location

- If the products crevice is exposed to electric conductors (solids or liquids), the product will short circuit and possibly create dangers of electric shock or fire. Please keep this product away form humidity, water, or dust.
- DO NOT use this product near gas as well as other flammable and/or explosive materials.
- Store the product where direct sunlight can't reach.
- DO NOT use the product where it's dirty, other machines are operated, or there is a high level of electromagnetic waves.
- DO NOT place the product on an unstable cart, stand, or tripod. Such usage creates the dangers of accident and/or damage to product.

4

## DSO-2090 USB Manual

## Hardware Specification

Input	
Max. sample rate	Realtime sampling: 100MS/s using one channel, 50MS/s using two channels
Channels	2
Bandwidth	40MHz analog bandwidth
Vertical resolution	8 bits/channel
Gain range	10mV ~ 5V/div @ x1 probe(10mV, 20mV, 50mV, 100mV, 200mV, 500mV, 1V, 2V, 5V/div:1,2,5 sequence) 100mV ~ 50V/div @ x10 probe 1V ~ 500V/div @ x100 probe 10V ~ 5KV/div @ x1000 probe
Range	8 divisions
Offset level	+/-4 divisions
Coupling	AC, DC
Offset increments	0.02 div
Impedance	1M ohm
DC accuracy	+/-3%
Input protection	35Vpk (DC + peak AC < 10 kHz, without external attenuation)
Display Mode	Y-T, X-Y
Timebase	
Timebase range	4ns/div ~ 1h/div(4ns, 10ns, 20ns, 40ns, 100ns, 200ns, 400ns, 1us, 2us, 4us, 10us, 20us, 40us, 100us, 200us, 400us, 1ms, 2ms, 4ms, 10ms, 20ms, 40ms, 100ms, 200ms, 400ms, 1s, 2s, 4s, 10s, 20s, 40s, 10m, 20m, 40m, 1h /div

6

## DSO-2090 USB Manual

Dimensions	187 x 100 x 33(mm)
------------	--------------------

## Introduction

DSO-2090 USB developed by our company, is a portable PC-based Digital Oscilloscope.

## High performance

DSO-2090 USB has the following features: 40MHz analog bandwidth, 100MHz real-time sampling.

## USB connected

DSO-2090 USB uses USB that supports plug'n play, with 12Mbps communication speed.

## Best performance for your dollar

DSO-2090 USB has many features that are comparable to the high speed stand-alone DSOs. But it costs a fraction of the price.

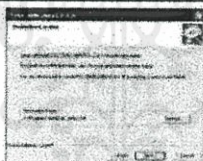
## No external power required

DSO-2090 USB does not need an external power source, because it is bus-powered from USB

## Easy to use

DSO-2090 USB is easy to use. It is intuitive and easy to understand.

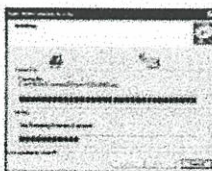
## DSO-2090 USB Manual



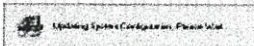
5. Check the setup information. Click Next to start copying of files.



6. This Status dialog is displayed during copying of files.



7. Updating Your System Configuration.



8. The installation is complete.

## DSO-2090 USB Manual

## Big screen

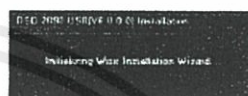
You can change DSO-2090 USB screen size as you need.

## Various data format processing

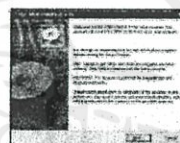
DSO-2090 USB can save waveform in the following formats: text file, jpg/bmp graphic file, MS excel/word file.

## Software Installation

1. While in Windows, insert the installation CD into the CD-ROM drive.
2. The installation should start up automatically. Otherwise in Windows Explorer, switch to the CD-ROM drive and run "Setup.exe".



3. The DSO-2090 USB Installation is started. Click 'Next' to continue.



4. Choose a destination directory. Click 'Next' to continue.

## DSO-2090 USB Manual



## Hardware Setup

1. Connect the A-Type Plug of USB cable to your PC'S USB port.



2. Connect the B-Type Plug of USB cable to DSO-2090 USB'S USB port.



3. New hardware is found.

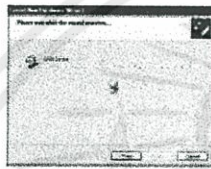
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหมดมีเทคนิคแบบส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



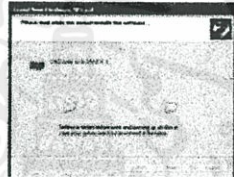
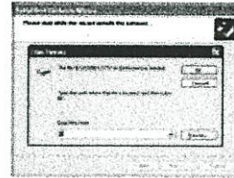
4. New hardware search wizard starts.



5. New hardware search wizard starts to search



6. New hardware wizard installs software



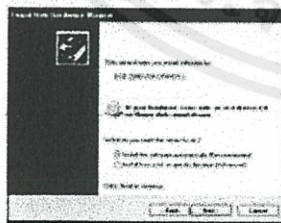
12

13

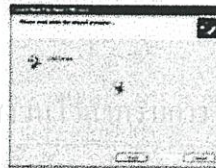
7. Finish new hardware search wizard



8. New hardware is found.

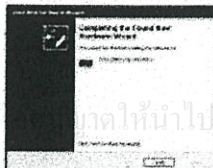
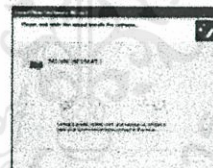


9. New hardware search wizard starts to search



10. New hardware search wizard starts to search

11. New hardware wizard installs software and finish new hardware search wizard



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ข้างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น... ไม่ว่าการนี้โดยทั้งอื่น... เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเขาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DSO-2000 USB Manual

## Setup DSO-2090 USB.inf under windows: 2000

When DSO-2090USB.inf file is not detected automatically, you see the following dialog box.

In this case you must install DSO-2090 USB.inf file manually.

1. Choose 'Search for a suitable driver for my device' button. Click Next to continue.
2. Specify a location. Click Next to continue.
3. The DSO-2090 USB.inf file is located in DSO-2090 USB CD-ROM root directory. Specify the location by either entering or browsing.
4. DSO-2090 USB.inf file is detected automatically. Click Next to continue.
5. Click Finish.



## Probe Calibration

## DSO-2090 USB Calibration

1. When manufactured, DSO-2090 USB is calibrated manually to obtain maximum performance.
2. You may calibrate DSO-2090 USB 5 or 6 months after purchase.

## Probe Compensation

1. You must use a probe with more than 40MHz bandwidth to get undistorted signal.
2. Probe should be compensated whenever it is connected for the first time.
3. Connect calibration signal to channel 1, then push AUTOSET.
4. Check the shape of the displayed waveform.
5. Adjust the probe until the displayed waveform is compensated.

16

17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

# บทความของผู้เขียน

### การศึกษาระดับการสั่นของสะพานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเซนเซอร์ A STUDY OF BRIDGE VIBRATIONS AS AN ENERGY SOURCE FOR EMBEDDED SENSORS

คอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ณัฐพร แสนจิตร, ณัฐพงศ์ เหมืองหล่อ และ ธงชัย ทองคำ

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
E-mail: kdon@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ นำเสนอการตรวจจิบระดับการสั่นของสะพานเพื่อนำไปออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน ให้กับเซนเซอร์ใดๆ เช่นการตรวจสอบความหนาแน่นของการจราจร และความสมบูรณ์ของโครงสร้างของ สะพาน การให้พลังงานเซนเซอร์ตรวจจิบต่างๆ นั้นทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสะพาน และช่วยพัฒนาระบบเครือข่ายในการส่งข้อมูล เพื่อช่วยให้สะดวกในการตรวจสอบ จากผลการวัดระดับการสั่นบริเวณสะพานในระดับการสั่นบนสะพาน หรือ บนถนนนั้นมีการสั่นที่น้อยเกินไปไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ในทางตรงกันข้ามระดับการสั่นที่บริเวณราวสะพานนั้น มีคุณสมบัติและเนื้อที่เพียงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นของเพียโซอิเล็กทริกจึงถูกออกแบบขึ้นมา

**คำหลัก:** สะพาน, การสั่น, การเก็บเกี่ยวพลังงาน และ เพียโซอิเล็กทริก

#### Abstract

This paper presents on vibration levels detected on bridge as a potential energy source for any sensors. Monitoring the traffic and the structural health of bridge requires numerous sensors. Powering these remote and partially embedded sensors from ambient energies will reduce maintenance costs, and improve the sensor network performance. The measurement results showed that the vibrations at any location on the bridge are too small for useful vibration harvesting. In contrast, the bridge edge features usable vibrations and sufficient mounting space. For this application site, a robust piezoelectric vibration harvester was designed.

**Keywords:** bridge, vibration, energy harvesting and Piezoelectric

#### 1. บทนำ

โครงสร้างพื้นฐานของสะพานนั้นสามารถที่จะตอบสนองต่อการกระทำต่างๆ จากสิ่งแวดล้อมรอบด้านได้ง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างสะพานและอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นบนสะพาน เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกของประชาชน ซึ่งระบบตรวจสอบดังกล่าวจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัดสภาพของสะพาน ซึ่งในปัจจุบันการพัฒนาในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสารแบบไร้สาย ทำให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็กแต่สามารถส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงได้อย่างรวดเร็ว ใน

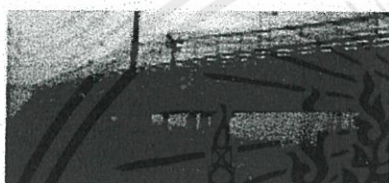
กรณีที่เกิดอุบัติเหตุต่างๆ จะสามารถช่วยลดปริมาณการสูญเสียและช่วยลดปัญหาการติดขัดของจราจรได้

ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนสะพานนั้นบางระบบอาจถูกฝังอยู่ในโครงสร้างของสะพานเพื่อให้ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และลดการดูแลรักษา ค่า ทำให้ยากแก่การเข้าถึงตัวเครือข่ายเซ็นเซอร์ เพราะฉะนั้นแหล่งพลังงานไร้สายเช่น แบตเตอรี่จึงมีความจำเป็น แต่แบตเตอรี่เองก็จำเป็นต้องเปลี่ยนเมื่อพลังงานหมดไป ดังนั้นการแก้ปัญหาเรื่องความยากในการเข้าถึงระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ คือการนำแหล่งกำเนิดพลังงานอื่นมาทดแทน โดยมุ่งเน้นไปที่การสั่นของสะพาน

ในบทความฉบับนี้จะมีข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการทดลอง เพื่อวัดการสั่นสะเทือนโดยหาบริเวณของสะพานที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด จากนั้นจึงนำข้อมูลผลการวัดและวิเคราะห์การสั่นของสะพาน เพื่อนำไปออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเหนี่ยวนำสร้างสนามไฟฟ้าในผลึกได้เมื่อได้รับแรง ซึ่งในบทความนี้คือแรงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของสะพาน

## 2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองเลือกวัดข้อมูลการสั่นที่สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังรูปที่ 1



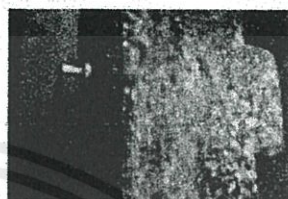
รูปที่ 1 สะพานข้ามมอเตอร์เวย์บริเวณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซึ่งพบว่าโครงสร้างของสะพานนั้นสามารถเคลื่อนไหวได้เมื่อมีแรงมากระทำ เนื่องจากสะพานนั้นเป็นโครงสร้างที่มีการยึดปลายทั้งสองด้านไว้ และปล่อยให้โครงสร้างตรงกลางเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ดังนั้นบริเวณกลางสะพานจึงเป็นบริเวณที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยการวัดการสั่นสะเทือนทำเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

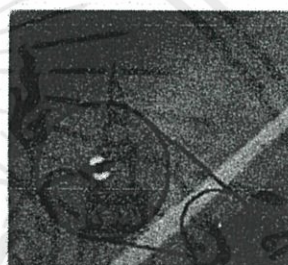
เริ่มการตรวจสอบโดยการนำอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) ไปทำการวัดตามตำแหน่งต่างๆ ของสะพานเพื่อตรวจสอบหาบริเวณของสะพานที่มีการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยวัดที่บริเวณราวสะพานทั้งแนวตั้งและแนวนอน และวัดที่บริเวณพื้นถนนบนสะพาน ดังรูปที่ 2 จากนั้นจึงทำการวัดความถี่ในกรณี ที่ไม่มีรถวิ่ง และ เมื่อมีรถวิ่ง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความถี่และแอมพลิจูดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน



(ก) การวัดการสั่นสะเทือนที่ราวสะพาน (แนวตั้ง)



(ข) การวัดการสั่นสะเทือนที่ราวสะพาน (แนวนอน)



(ค) การวัดการสั่นสะเทือนบนถนนที่สะพาน รูปที่ 2 ตำแหน่งที่วัดการสั่นสะเทือน

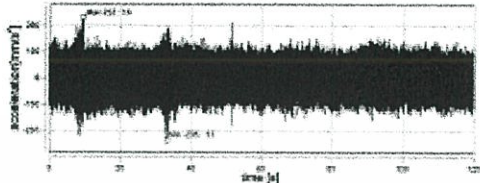
หลังจากวัดการสั่นสะเทือนของสะพานในกรณีต่างๆ แล้ว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นความถี่ของการสั่นของสะพาน เราจะนำข้อมูลนี้มาวิเคราะห์ โดยทำฟูริเยร์แบบเร็วแล้วหาค่าเฉลี่ย และแยกแยะความถี่ของรถยนต์แต่ละชนิด โดยการนำกราฟที่ได้จากการทำฟูริเยร์แบบเร็วมาเทียบกับสภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกไว้ เพื่อหาความถี่ของสะพานที่มีแอมพลิจูดสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งก็คือความถี่เรโซแนนซ์ของสะพาน

จากนั้นจึงนำความถี่เรโซแนนซ์ของสะพานที่วัดได้ไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับสะพาน เพื่อให้ขณะที่สะพานสั่น อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเกิดการสั่นไปพร้อมกับสะพาน และเกิดการกระจัดสูงสุด ทำให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดความถี่สูงสุดและซึ่งให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

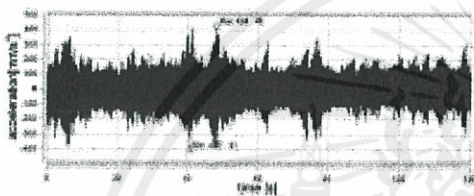
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลอง

จากการนำอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนไปวัดตามตำแหน่งต่างๆ ของสะพาน ทำให้ได้ข้อมูลกราฟแสดง ความเร่งเทียบกับเวลาหรือ ข้อมูลแอมพลิจูดการสั่นของ สะพาน ดังรูปที่ 3 ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าแรงบิด ของสะพานที่มีภาระสั่นสะเทือนมากที่สุด



(ก) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณบน สะพาน

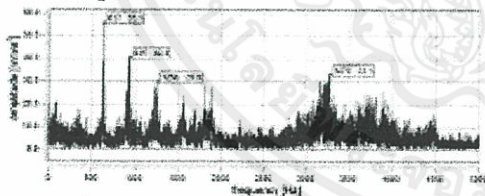


(ข) กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลาบริเวณราวสะพาน (แนวนอน)

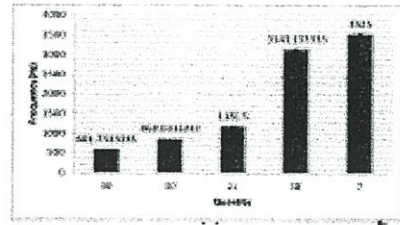
รูปที่ 3 กราฟแสดงความเร่งเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 3 จะพบว่าภาระสั่นสะเทือนที่บริเวณราว สะพานแนวนอนจะมีการสั่นสะเทือนสูงกว่าที่บริเวณ สะพานซึ่งการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $424 \text{ m/s}^2$

จากนั้นจึงเก็บข้อมูลโดยวัดที่ราวสะพาน 30 ครั้ง ความยาวในการเก็บครั้งละ 2 นาทีแล้วนำมาหุริเยร์แบบ เร็วแล้ววิเคราะห์จำนวนความถี่ที่พบจากการวัด 30 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4



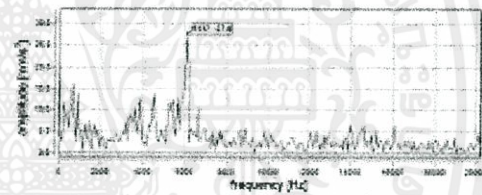
(ก) หนึ่งในกราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ใน ช่วงเวลาสองนาทีจากการวัดบริเวณราวสะพาน



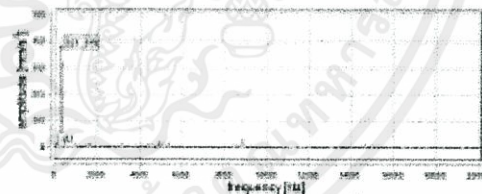
(ข) กราฟแสดงความถี่ที่พบในการวัด 30 ครั้ง รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์การวัดความถี่ที่ราวสะพาน

จากรูปที่ 4 พบว่าภาระสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นประกอบ ไปด้วยหลายความถี่แต่ความถี่ที่พบทุกครั้งในการวัดคือ 600 Hz, 870 Hz, 3150 Hz และในช่วงความถี่สูงจะมี แชนต์วิคัลมากกว่าในช่วงความถี่ต่ำความ

ความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันตามพาหนะที่ ผ่าน เช่น รถบรรทุก รถยนต์ส่วนตัว รถแท็กซี่ รถตู้ รถ สองแถว รถโดยสารประจำทาง รถทัวร์ เป็นต้น ซึ่งจาก การวิเคราะห์ ผลพบว่าเมื่อรถที่มีน้ำหนักน้อยเช่นรถยนต์ จะเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงแต่มีแอมพลิจูดที่ต่ำ และเมื่อรถที่มีน้ำหนักมากเช่นรถบรรทุกผ่านจะเกิดการ สั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำแต่จะมีแอมพลิจูดที่สูงมาก ดัง แสดงในรูปที่ 5



(ก) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของรถยนต์

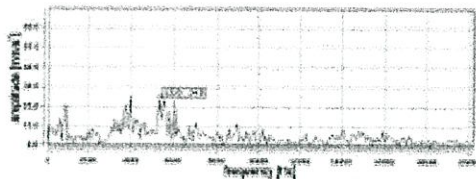


(ข) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของรถบรรทุก รูปที่ 5 กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ที่เกิดขึ้น

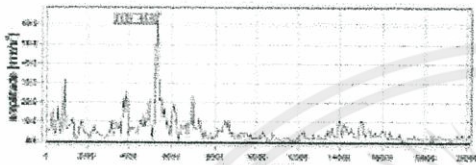
จากรูปที่ 5 เมื่อรถบรรทุกผ่านจะมีแอมพลิจูดสูงกว่า รถยนต์มากจึงมีโอกาที่จะสามารถให้พลังงานได้มากกว่า ในกรณีเดียวกันหากเป็นรถชนิดเดียวกันแต่บรรทุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักไม่เท่ากันจะให้ความถี่เท่ากันแต่รูปที่บรรทุกของมากกว่าจะได้แอมพลิจูดที่สูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 6



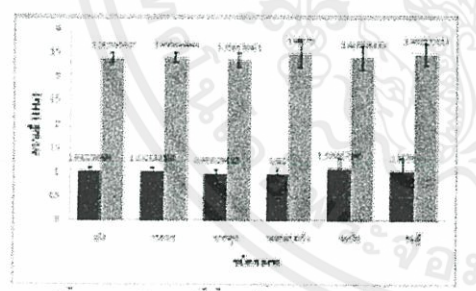
(ก) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของบรรทุกขนาดเล็กที่บรรทุกของน้อย



(ข) กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของบรรทุกขนาดเล็กที่บรรทุกของมาก

รูปที่ 6 กราฟแสดงแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ ของรถชนิดเดียวกันแต่น้ำหนักต่างกัน

จากการเก็บข้อมูลข้อมูล 30 ครั้งในพื้นที่บริเวณราวสะพาน แนวนอน และนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อแยกแยะความถี่ของรถแต่ละชนิดทำให้ทราบว่าการรถแต่ละชนิดสามารถทำให้สะพานสั่นที่ความถี่ได้หลายช่วง แต่ช่วงที่พบบ่อยมีอยู่ไม่มาก รูปที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยความถี่ที่พบบ่อยของรถแต่ละชนิด ซึ่งรถทุกชนิดทำให้สะพานสั่นที่ความถี่ 3300 Hz ถึง 3500 Hz และประมาณ 900 Hz



รูปที่ 7 กราฟความถี่ที่พบบ่อยของรถแต่ละชนิด

จะเห็นว่าพาหนะชนิดเดียวกันนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดความถี่ในช่วงเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้น สามารถ

ออกแบบให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมีความถี่เรโซแนนซ์ได้แค่ 1 ถึง 2 ความถี่เท่านั้น ถ้าต้องการให้ได้จำนวนความถี่เรโซแนนซ์มากกว่านี้ จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งในกรณีทดลองนี้เลือกความถี่ประมาณ 3000 Hz ที่มีช่วงแบนด์วิดท์กว้างที่สุด

4. การออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

การออกแบบและจำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ทำโดยทดลองเปลี่ยนแปลงรูปจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปทรงต่างๆ เช่น รูปหลายเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมู แล้วจึงนำรูปจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานมาขึ้นในรูปแบบ Cantilever และ Bridge เพื่อทดสอบว่ารูปจำลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบต่างๆ มีความถี่ต่างกันอย่างไร ดังรูปที่ 8 โดยที่ทั้งสองรูปแบบมีขนาดกว้าง 50 ไมครอน ยาว 50 ไมครอน และหนา 10 ไมครอน แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้ให้ความถี่ที่ตรงกับความถี่การสั่นของสะพาน



(ก) อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบ Bridge

(ข) อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบ Cantilever

รูปที่ 8 รูปจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

หลังจากที่ได้จำลอง อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ ทำให้ทราบขนาดและรูปทรงของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งสามารถนำขนาดและความถี่ของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไปจำลองทำการกระจัดจากการทดลองใส่แรงไปกระทำ ณ จุดที่คาดว่าจะเกิดการกระจัดสูงสุดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน หลังจากทราบค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นแล้ว จึงนำค่าการกระจัดนั้นไปจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานโดยการทดลองใส่การก้ำจัดลงไป ณ จุดเดิมเพื่อต้องการหาความเค้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ในรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 9 ซึ่งจะทำให้ทราบว่า อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน รูปแบบไหน ที่ให้ความคุ้มค่าเชิงและมากที่สุด



(ก) อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบ Bridge ทรงสี่เหลี่ยมที่ผิวที่ความถี่ 3000 Hz



(ข) อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบ Cantilever ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่ความถี่ความถี่ 3000 Hz รูปที่ 9 การจำลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ความถี่เท่ากัน

จากรูปที่ 9 พบว่าที่ความถี่ 3000 Hz ใน Cantilever จะมีค่าความเค้นมากกว่า Bridge เพราะฉะนั้นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในรูปแบบ Cantilever จึงสร้างพลังงานได้มากกว่าหลังจากที่จำลองอุปกรณ์แล้วนำมาออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ทำชุดทดลอง ทดสอบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ไปติดตั้งที่สะพานเพื่อตรวจสอบการทำงานต่อไป

##### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Isarakorn, A. Sambri, P. Janphuang, D. Briand, S. Gariglio, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, Epitaxial piezoelectric MEMS on silicon, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, 055008, 2010.
- [2] M. Wischke, M. Masur, M. Kröner and P. Woias, Vibration harvesting in traffic

tunnels to power wireless sensor nodes, Laboratory for Design of Microsystems, University of Freiburg, Germany, 2011.

- [3] Lee J H, Hwang K S, Park J, Yoon K H, Yoon D S and Kim T S 2005 Immunoassay of prostate-specific antigen (PSA) using resonant frequency shift of piezoelectric nanomechanical microcantilever *Biosens. Bioelectron.*
- [4] Tsai J Z, Chen C J, Chen W Y, Liu J T, Liao C Y and Hsin Y M 2009 A new PZT piezoelectric sensor for gravimetric applications using the resonance-frequency detection *Sens. Actuators.*
- [5] Pang W, Yan L, Zhang H, Yu H, Kim E S and Tang W C 2006 Femtogram mass sensing platform based on lateral extensional mode piezoelectric resonator *Appl. Phys. Lett.*
- [6] Sokmen U, Stranz A, Waag A, Ababneh A, Seidel H, Schmid U and Peiner E 2010 Evaluation of resonating Si cantilevers sputter-deposited with AlN piezoelectric thin films for mass sensing applications *J. Micromech. Microeng.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Isarakorn, A. Sambri, P. Janphuang, D. Briand, S. Gariglio, J. -M. Triscone, F. Guy, J. W. Reiner, C. H. Ahn, and N. F. de Rooij, Epitaxial piezoelectric MEMS on silicon, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 20, 055008, 2010.
- [2] M. Wischke, M. Masur, M. Kröner and P. Woias, Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes, Laboratory for Design of Microsystems, University of Freiburg, Germany, 2011.
- [3] <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/37/wave/sound1/resonanc.htm>
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Image-Tacoma\\_Narrows\\_Bridge1.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Image-Tacoma_Narrows_Bridge1.gif)
- [5] <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin>
- [6] <http://www.biomed.in.th/strain-gauge-piezoelectric-accelerometer-in-medical-engineering>
- [7] <http://www.sptc.ac.th>
- [8] <http://www.thaieasyelec.com>
- [9] <http://www.easterngage.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้