



การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานจากวัสดุ PZT  
จากการจำลองการทำงานเครื่องจักร  
The Comparison of Energy Absorption Capability from PZT  
For Machine Vibration Analysis

นายฉัตร เพชรทวีรัตน์  
นางสาวจุฑามาส กลีบพืง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานจากวัสดุ PZT  
จากการจำลองการทำงานเครื่องจักร  
The Comparison of Energy Absorption Capability from PZT  
For Machine Vibration Analysis

นายฉัตร เพชรทวีรัตน์  
นางสาวจุฑามาส กลีบพื้ง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อปริญญาบัตร การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานจากวัสดุ PZT  
จากการจำลองการทำงานเครื่องจักร

ชื่อ นามสกุล นายธัญธร เพชรทวีรัตน์  
นางสาวจุฑามาส กลีบพึ้ง

ชื่อปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม

คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนพงศ์ สารอินทร์, ปร.ด.

คณะกรรมการสอบได้ให้ความเห็นชอบปริญญาบัตรฉบับนี้แล้ว

..... จิระศักดิ์ ..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ จิระศักดิ์ ธาระจักร์, ปร.ด.)

..... วิไลวรรณ ลีระกุล ..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิไลวรรณ ลีระกุล, วท.ด.)

..... ..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนพงศ์ สารอินทร์, ปร.ด.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
อนุมัติให้รับปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม

วันที่ 2 เดือน มีนาคม พ.ศ.2563

ชื่อปริญญาโท	การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานจากวัสดุ PZT จากการจำลองการทำงานเครื่องจักร
ชื่อ - สกุล	นายธัญธร เพชรทวีรัตน์ นางสาวจุฑามาส กลีบพึ้ง
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม)
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำและทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการสั่นสะเทือน ผลลัพธ์ที่ได้มาจากการจำลองสถานะการทำงานของเครื่องจักรขนาดเล็ก เพื่อให้ได้แรงกลจากการสั่นของเครื่องจักรโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (พีแซดที) พบว่าความขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้ของแต่ละเงื่อนไขส่งผลต่อการดูดซับพลังงาน มีตัวแปรที่สนใจของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันที่ขนาด 27 และ 35 มิลลิเมตร

ผลจากการทดลองพบว่าค่า การขจัดไดอิเล็กทริกแปรผันตรงกับแรงที่ใช้แต่แปรผกผันกับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก นอกจากนี้ความสามารถดูดซับพลังงานที่ในช่วงเวลาหนึ่งวินาทีที่มีค่าเป็น 4.51 โวลต์ และได้พลังงานสูงสุดที่ประมาณ  $7.4 \times 10^{-8}$  จูล

คำสำคัญ : การดูดซับพลังงาน, วัสดุเพียโซอิเล็กทริก, ไดอิเล็กทริก

<b>Project title</b>	The Comparison of Energy Absorption Capability from PZT For Machine Vibration Analysis
<b>Author</b>	Mr.Thanyathron Peachdaweerach Miss.Jutamas Greepphung
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Materials Science)
<b>Major</b>	Industrial Materials Science
<b>Academic Year</b>	2019

## ABSTRACT

The purpose of the research is to devise and implement for testing the ability to absorb energy from vibration. The results are obtained from simulating the operating status of small machines. In order to get the mechanical force from the vibrating of the machine by using piezoelectric materials (PZT) It was found that the size of the piezoelectric materials used in each condition affected the energy absorption. There are variables interested in different diameters at 27 and 35 millimeters.

The result shows that the dielectric displacement is directly proportional to the force used but is inversely proportional to the size of the cross-sectional area of the piezoelectric material. In addition, the ability to absorb energy in one second is 4.51 volts and has a maximum energy of  $7.4 \times 10^{-8}$  joules.

**Keywords:** Absorb Energy, Piezoelectric Materials, Dielectric

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สารอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่เป็ประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร์ ผู้ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ ทีมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทุกท่านที่เคยสั่งสอนและให้ความรู้ จนก่อให้เกิดความรู้และสามารถนำมาช่วยในการวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่

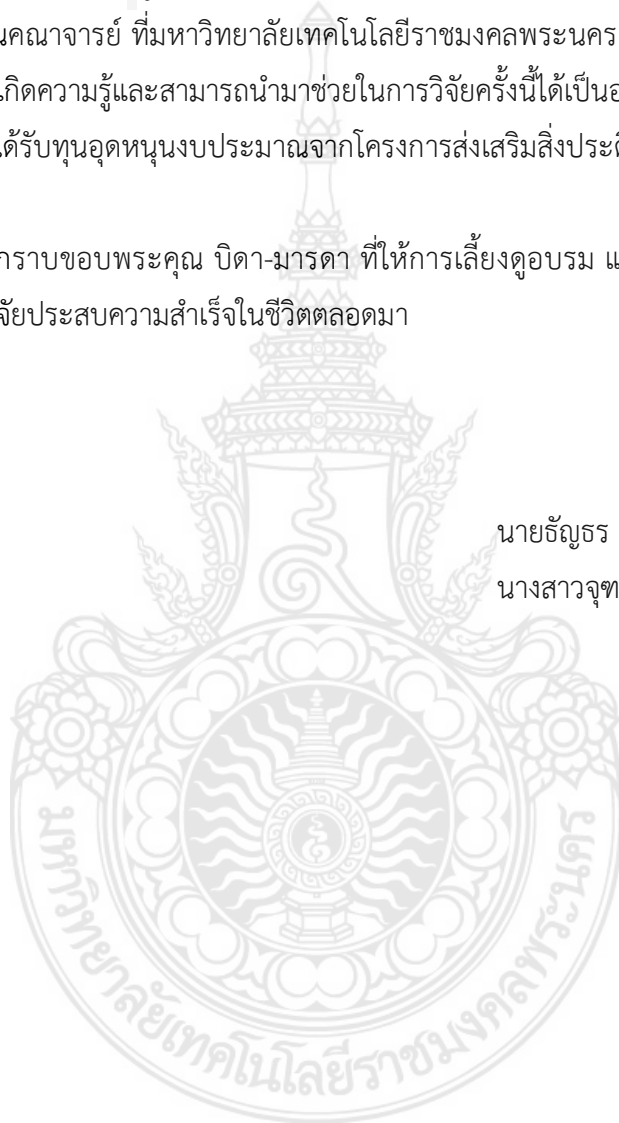
ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

นายธัญธร

เพชรทวิรัตน์

นางสาวจุฑามาส

กสิบพิง



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1      บทนำ	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2    วัตถุประสงค์	2
1.3    ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5    ระยะเวลาดำเนินงาน	3
2      แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1    บทนำ	4
2.2    ทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐาน	4
2.2.1    ปรัชญาการณพีโซและอิเล็กทรอนิกส์ที่ฟ	4
2.2.2    การเก็บเกี่ยวพลังงาน	6
2.3    งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
3      วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1    วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2    วิธีการทดลอง	25
3.2.1    ขั้นตอนเขียนโค้ดคำสั่งในโปรแกรม LabVIEW 2017	26
3.2.2    ขั้นตอนการออกแบบหัวตรวจจับต้นแบบด้วยโปรแกรม Autodesk inventor	27
3.2.3    ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบหัวตรวจจับต้นแบบโดยวิธีการกลึง	29
3.2.4    ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักตัวแปรของตุ้มน้ำหนักแต่ละขนาด	29
3.2.5    ขั้นตอนหล่อแผ่นแม่เหล็กในเรซินและทำการติดตั้งเข้าที่ต้นแบบหัว ตรวจสอบ	30

## สารบัญ (ต่อ)

## หน้า

3.2.6	ขั้นตอนการจำลองการทดสอบการสั่นสะเทือน	31
3.2.7	ขั้นตอนการประกอบชุดตรวจหัวตรวจจับต้นแบบเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	31
3.2.8	ขั้นตอนการติดตั้งชุดหัวตรวจจับต้นแบบเข้ากับชุดจำลองการสั่นสะเทือน	32
3.2.9	ขั้นตอนการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลตามตัวแปรที่สนใจ	33
3.2.10	ขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะของการสั่นสะเทือนจากกราฟของสัญญาณจากการสั่นสะเทือน	34
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	35
4.1	การศึกษาลักษณะของสัญญาณที่มีผลจากตัวแปรภายนอก	36
4.2	การศึกษาลักษณะสัญญาณจากแผ่นPZT	36
4.3	การศึกษาลักษณะของข้อมูลของตัวแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	42
4.4	การศึกษาค่า Dielectric displacement ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจากตัวแปรภายนอก	46
4.5	ตารางสรุปผลการทดลอง	49
5	สรุปผลการวิจัย	50
5.1	สรุปผลการวิจัย	50
5.2	ข้อเสนอแนะ	51
	รายการอ้างอิง	52
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดต่าง ๆ	53
	ภาคผนวก ข. Product Search Data Sheet	57
	ประวัติการศึกษา	59



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	อุปกรณ์ใช้ในการทดลอง	23
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	24
4.1	ตัวแปรที่สำคัญของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	35
4.2	สรุปผลการทดลอง Piezoelectric ขนาด 27 mm	49
4.3	สรุปผลการทดลอง Piezoelectric ขนาด 35 mm	49



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (ก) โดยตรง และ (ข) โดยอ้อม เมื่อ (i) แสดงการหดตัว และ (ii) แสดงการขยายตัว (เส้นประแสดงถึงขนาดของวัสดุในตอนเริ่มต้น)	5
2.2	ตัวอย่างพลังงานภายนอกที่ใส่เข้าไปในระบบการสั่นสะเทือน	9
2.3	รูปแบบของพลังงานภายนอกที่ให้กับระบบการสั่นสะเทือน	10
2.4	ความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่แรงกระตุ้นต่าง ๆ	10
2.5	แบบจำลองการสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุล และ FBD	11
2.6	ตัวอย่างการกระตุ้นที่มีลักษณะเป็นคาบ	12
2.7	การกระแทกและการจำลองการกระแทกทางคณิตศาสตร์	13
2.8	ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก	15
2.9	การสั่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นไพโซอิเล็กทริก	16
2.10	โครงสร้างผลึกของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (ก) อุณหภูมิสูงกว่า Curie point ( $T_c$ ) (ข) อุณหภูมิต่ำกว่า Curie point	19
2.11	วิฤภาคที่เสถียรของ $Pb(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	20
2.12	Relative permittivity ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกบริเวณ morphotropic phase boundary (MPB)	20
2.13	โครงสร้างผลึกของ Tungsten bronze	22
3.1	ขั้นตอนเขียนโค้ดคำสั่ง (ก) block diagram คำสั่งของโค้ดใน โปรแกรม LabVIEW (ข) front panel หน้าต่างที่ใช้แสดงค่า	25
3.2	หัวตรวจจับการสั่นสะเทือนขนาดสำหรับ PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm (ก) แบบประกอบระหว่างฝาครอบนอกและฐาน (ข) ฝาครอบด้านนอก (ค) ฐานสำหรับวาง PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm เพื่อติดกับอุปกรณ์ (ง) ตั้มน้ำหนักที่1 15.5g (จ) ตั้มน้ำหนักที่2 20.4g (ฉ) ตั้มน้ำหนักที่3 29.4g	27
3.3	หัวตรวจจับการสั่นสะเทือนขนาดสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27mm (ก) แบบประกอบระหว่างฝาครอบบนกับฐานล่าง (ข) แกนกลางสำหรับ เชื่อมต่อ ระหว่างฐานกับฝาครอบด้านบน (ค) ฝาครอบด้านบน (ง) ตั้มน้ำหนักที่ 15.4g 21.3g 29.4g ตามลำดับ (จ) ฐานล่างสำหรับติดกับอุปกรณ์	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน (ก) ขั้นตอนระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงาน หัวตรวจจับต้นแบบ (ข) ชิ้นส่วนประกอบของหัวตรวจจับสำหรับPZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27mm (ค) ชิ้นส่วนประกอบของหัวตรวจ จับสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35mm	29
3.5	ขั้นตอนที่ชั่งน้ำหนักตัวแปรของตุ้มน้ำหนักสำหรับPZTขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 27 mm (ก)ตุ้มน้ำหนักที่1 15.4g (ข) ตุ้มน้ำหนักที่2 21.3g (ค) ตุ้มน้ำหนักที่3 29.4g	29
3.6	ขั้นตอนที่ชั่งน้ำหนักตัวแปรของตุ้มน้ำหนักสำหรับPZTขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 35 mm (ก) ตุ้มน้ำหนักที่1 15.5g (ข) ตุ้มน้ำหนักที่2 20.4g (ค) ตุ้มน้ำหนักที่3 29.3g	29
3.7	ขั้นตอนการหล่อแผ่นแม่เหล็ก (ก) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหล่อเรซินประกอบด้วย Epoxy Resin, Epoxy Hardener แผ่นแม่เหล็ก โมลสำหรับหล่อชิ้นงาน ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง30mm ครีมาวาสลิน (ข) ชิ้นงานหลังจากการทำ การหล่อเรซินกับแม่เหล็กที่เวลา8ชั่วโมง	30
3.8	ขั้นตอนการตัดแต่งเรซิน (ก) ขั้นตอนติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องตัดชิ้นงาน แบบละเอียด (ข) การติดตั้งชิ้นงานเรซินเข้ากับตัวจับชิ้นงาน	30
3.9	ขั้นตอนการจำลองการทดสอบ(ก) ขั้นตอนการสร้างการจำลอง การสั่นสะเทือน	31
3.10	ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักระบบของหัวตรวจจับต้นแบบ (ก) ชั่งน้ำหนักหัวตรวจจับต้นแบบสำหรับPZT ที่ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 35mm ที่น้ำหนัก 233.5g (ข) ชั่งน้ำหนักหัวตรวจจับต้นแบบ สำหรับ PZT ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27mm ที่น้ำหนัก 231.8g (ค) รูปประกอบหัวตรวจสอบ	31
3.11	ขั้นตอนการติดตั้งหัวตรวจจับต้นแบบ (ก) การทดสอบการดูดซับพลังงาน ของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร (ข) การทดสอบการดูดซับพลังงานของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร	32
3.12	ตารางแสดงขั้นตอนการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลตามตัวแปรที่สนใจ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	
ชั้นตอนการวิเคราะห์(ก) กราฟแสดงขนาดที่ตรวจจับการสั่นสะเทือน ที่ได้จากหัวตรวจจับต้นแบบที่PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 mm	
(ข) กราฟแสดงขนาดที่ตรวจจับได้จากหัวตรวจจับต้นแบบที่ PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm	34
4.1	35
ลักษณะของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PZT	
4.2	
กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก 15.4g	36
4.3	
กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก 21.3g	37
4.4	
กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก 29.4g	38
4.5	
กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก 15.5g	39
4.6	
กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก 29.3g	40
4.7	
กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก 20.4g	41
4.8	
กราฟแสดงค่าของสัญญาณข้อมูลจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g	42
4.9	
กราฟแสดงค่าของสัญญาณข้อมูลจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร ที่ตัวแปรน้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g	44
4.10	
กราฟแสดงค่า Dielectric displacement จากแผ่นPZTขนาด 27 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g	46
4.11	
กราฟแสดงค่า Dielectric displacement จากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตรที่น้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g	48

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาของอุตสาหกรรมภายในประเทศไทยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามแผนพัฒนาไทยแลนด์ 4.0 จึงทำให้มีการเติบโตขึ้นไปอย่างรวดเร็วและยังช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยให้มีการส่งออกที่สูงขึ้นทำให้ภาพรวมของเศรษฐกิจดีขึ้นจากเดิมและในส่วนของการใช้งานเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมนั้นก็ยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกำไรในการผลิตส่วนหนึ่งเนื่องจากการใช้งานเครื่องจักรนั้นมักจะมีการใช้งานที่หนักหน่วงและยังต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนขับเคลื่อนเครื่องจักรกลซึ่งโดยส่วนใหญ่การทำงานของเครื่องจักรนั้นในขณะที่เครื่องจักรทำงานมักจะมีแรงทางกลหรือการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการผลิต

ในปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นน้ำมันดิบก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลัก ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ และในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานที่มากขึ้น จึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่คิดค้นหาวิธีการเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อจะหาแหล่งพลังงานทดแทนหรือมาตรการประหยัดพลังงานให้แก่ประเทศ ซึ่งรูปแบบของพลังงานทดแทนในปัจจุบันมีมากมาย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานเคมีจากไฮโดรเจน พลังงานไบโอดีเซล ฯลฯ ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting) จากพลังงานที่สูญเสียไปเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยประหยัดพลังงานและลดการนำเข้าพลังงานได้ อย่างไรก็ตามการเก็บเกี่ยวพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือการเก็บเกี่ยวพลังงานกล ซึ่งพลังงานกลที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันมีมากมายตลอดเวลาและไม่หมดอย่างแน่นอน เช่น ในยุคปัจจุบันเป็นยุคของอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมักจะเกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรตลอดระยะเวลาการทำงานในการผลิต

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้จากการอาศัยแรงทางกลจากการสั่นสะเทือน จากการทำงานของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งวัสดุชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานของตัวเอง สำหรับใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้สามารถนำไปบรรจุในตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ก็ได้และสามารถนำไปชาร์จอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงหรืออุปกรณ์รับรู้ในการตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าที่ผิดปกติจากเดิม ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่เกิดความเสียหายภายในเครื่องจักรเพื่อลดต้นทุนของการซ่อมบำรุงก่อนการเกิดความเสียหาย

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกในการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขของชิ้นงานทดสอบ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อเกิดการสั่นสะเทือน
- 1.2.3 เพื่อสร้างอุปกรณ์ในการตรวจจับพลังงานไฟฟ้า จากการสั่นสะเทือนโดยนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกติดตั้งในหัวตรวจสอบต้นแบบ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการตรวจจับการสั่นสะเทือน คือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก
- 1.3.2 ออกแบบหัวตรวจสอบที่เหมาะสมในการติดตั้งของแผ่นเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก
- 1.3.3 จำลองสถานการณ์การสั่นสะเทือน
- 1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่เกี่ยวข้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน
- 1.3.5 ควบคุมเซ็นเซอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถสร้างรูปแบบการตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือน
- 1.4.2 เป็นการนำความรู้ทางด้านวัสดุศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานจริง
- 1.4.3 เผยแพร่ผลงานทางวิชาการและองค์ความรู้
- 1.4.4 การนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

## 1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน

กิจกรรม	พ.ศ. 2562			พ.ศ. 2563		
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมของการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	←→					
2. วางแผนการทำโครงการ กิจกรรมที่ต้องดำเนินการ ระยะเวลา และกำหนดขอบเขต ตัวแปรการ ทดสอบและเงื่อนไขในการทำโครงการ		←→	→			
3. จัดซื้อวัสดุ จัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ เพื่อใช้ในการทำโครงการ			←→	→		
4. ทดสอบการใช้งานตามเงื่อนไขและตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ เพื่อหาประสิทธิภาพและปรับปรุง คุณภาพ				←→	→	
5. รวบรวมข้อมูลการทำโครงการ การดำเนินการ ผลการทดสอบ และสรุปผลการดำเนินการทดลองศึกษา					←→	→



## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐาน ปรัชญาการณพีโซและอิเล็คโตร สตริกทีฟ การเก็บเกี่ยวพลังงาน ตัวตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากวัสดุเพียโซอิเล็คทริก การวิเคราะห์ ข้อมูล จากการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ วัสดุเฟอร์โรอิเล็ค ทริก การตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างโลหะการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการหยดลงของฝนที่ตก ลงมากระทบแผ่นเพียโซอิเล็คทริกทำให้เกิดการสั่นสะเทือน การแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ (Fast fouries transform, FFT) ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน การสั่นสะเทือนแบบ บังคับจากแรงรูปแบบต่างๆ การวัดและการจัดการสัญญาณการสั่นสะเทือนเบื้องต้น และความรู้ พื้นฐานของโปรแกรม LabVIEW

#### 2.2 ทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐาน

##### 2.2.1 ปรัชญาการณพีโซและอิเล็คโตรสตริกทีฟ

ปรัชญาการณพีโซและอิเล็คโตรสตริกทีฟ (Piezoelectric and \ Electro strictive Effects ) วัสดุทุกตัวจะเกิดเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ถ้า ความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นเป็นส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้ากำลังสอง เราเรียกว่าปรัชญาการณพีโซ ปรัชญาการณอิเล็คโตร สตริกทีฟ (electro strictive Effects) ในขณะที่วัสดุบางตัวจะแสดง ปรัชญาการณในทางตรงข้าม กล่าวคือ มีการเกิดโพลาไรเซชันทางไฟฟ้า (electrical polarization) ขึ้น เมื่อเกิดความเครียดในวัสดุเนื่องจากความเค้น (stress) ที่ให้เข้าไป ปรัชญาการณลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า ปรัชญาการณเพียโซอิเล็คทริก (piezoelectric effects) โดยการประมาณอย่างคร่าวๆ ถ้า การเกิดโพลาไรเซชัน (polarization) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นจะเรียกว่า ปรัชญาการณ เพียโซอิเล็คทริกโดยตรง (direct piezoelectric effects) และในทางกลับกันวัสดุเพียโซอิเล็คทริกยัง สามารถที่จะมีการเกิดขึ้นของความเครียด ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ปรัชญาการณนี้ถูก เรียกว่า ปรัชญาการณเพียโซ อิเล็คทริกโดยอ้อม (converse piezoelectric effects)



ปรากฏการณ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

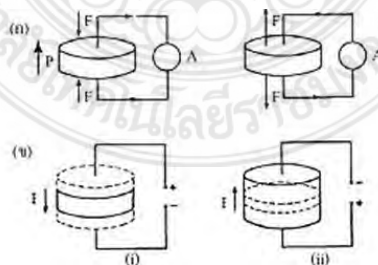
$$X = ME^2 \quad (2.1)$$

โดยที่  $M$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟ หรือถ้าแสดงในเทอมของการ กระจัดทางไดอิเล็กทริก  $D$  ก็จะได้ว่า

$$X = QD^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $Q$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟอีกตัวหนึ่ง

จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟเป็นเทนเซอร์ลำดับที่สี่ (fourth-rank tensor) เนื่องจากแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทนเซอร์ความเครียด (ลำดับที่สอง) กับผลคูณไขว้ (cross-product) ของ  $D$  หรือ  $E$  ในทุกทิศทาง ในวัสดุหลักเชิงเดียวทั้ง 32 หมู่ (class) มีอยู่ 11 หมู่ ที่มีสมมาตรศูนย์กลาง (center of symmetry) ดังนั้นจึงไม่มีขั้วไฟฟ้า (non-polar) ในขณะที่อีก 21 หมู่ที่ไม่มีสมมาตรศูนย์กลาง (non-centrosymmetric) โดยมีอยู่ 20 หมู่ที่แสดงปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก และอีก 1 หมู่ซึ่งอยู่ในระบบลูกบาศก์มีลักษณะของสมมาตรที่เมื่อรวมตัวกันแล้วจะไม่แสดงปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกออกมา ถ้าแผ่นไพโซอิเล็กทริก (ดังรูปที่ 2.1) ซึ่งมีขั้วในทิศทางแสดงด้วย  $P$  ที่มรับขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดบนผิวหน้าทั้งสอง ดังนั้นแรงกดดันอัด (compressive stress) จะมีผลทำให้กระแสไฟชั่วครู่ไหลผ่านวงจรข้างนอก โดยที่แรงเค้นดึง (tensile stress) จะมีผลทำให้กระแสไหลในทิศทางตรงกันข้าม (ดังรูปที่ 1 (ก.)) ในทางกลับกัน สนามไฟฟ้าที่ให้กับแผ่นวัสดุทำให้เกิดความเครียดในผลึกไม่ว่าจะเป็นในลักษณะความเครียดอัด (compressive stress) หรือถ้าสนามไฟฟ้าถูกกลับขั้วจะทำให้เกิดความเครียดดึง (tensile stress) (ดังรูปที่ 1 (ข.)) การเปลี่ยนสภาพการมีขั้วซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกโดยตรง จะนำไปสู่การเกิดของประจุที่พื้นผิวผลึกและการเกิดกระแสถ้าในกรณีที่ป็นวงจรปิด (closed circuit)



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (ก) โดยตรง และ (ข) โดยอ้อม เมื่อ (i) แสดงการหดตัว และ (ii) แสดงการขยายตัว (เส้นประแสดงถึงขนาดของวัสดุในตอนเริ่มต้น)

## 2.2.2 การเก็บเกี่ยวพลังงาน

ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวเพื่อใช้งานกับ เซนเซอร์โนดไร้สาย โดยจะใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลนี้ มาผ่านวงจรสำหรับ จัดการพลังงานเพื่อนำไปจ่ายให้กับตัวเซนเซอร์โนดไร้สาย หรือชาร์จพลังงานให้กับแบตเตอรี่ของ เซนเซอร์โนดไร้สาย ซึ่งจากการวิจัยจะพบว่าการตีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาด  $12.7 \times 31.8 \times 0.51$  มิลลิเมตร 31 ครั้ง จะให้แรงดันสูงสุดที่ 21.3 โวลต์ และได้พลังงานเฉลี่ยที่ประมาณ 25.94 ไมโครจูล ซึ่งสามารถเป็นพลังงานให้กับเซนเซอร์โนดไร้สายที่อยู่ในสภาวะหลับ (Sleep) ได้ 1.44 วินาที หรือใช้ในการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โนดไร้สายได้ 1 แพ็คเก็ต ต่อการตีประมาณ 32.29 ครั้ง

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าพบว่า มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุโพโซ อิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน ปริมาณพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ รวมทั้ง การประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มีดังนี้

นิตยา ใจทอง สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2014) ทำการ ตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากวัสดุผสมซีเมนต์-เซรามิกเพียโซอิเล็กทริก นำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาผสม กับปูนซีเมนต์จะสามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นผลิตภัณฑ์ตัวตรวจวัดการสั่นสะเทือน (เซนเซอร์) สำหรับวัดความสั่นสะเทือนในโครงสร้างตึกคอนกรีตได้ ซึ่งการผสมปูนซีเมนต์ลงไปจะช่วยทำให้ค่า ความต้านทานเสียงซ้อน (acoustic impedance) คอนเวอร์ส (converse effect) ใกล้เคียงกับของ โครงสร้างตึกคอนกรีตเมื่อนาผลิตภัณฑ์เซนเซอร์ที่ผลิตจากเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ใส่ใน โครงสร้างตึกหากตึกได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวผลิตภัณฑ์เซนเซอร์ในตึกจะเปลี่ยน แรงสั่นสะเทือนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องแปลงสัญญาณเพื่อรายงานค่า ความสั่นสะเทือนซึ่งจากผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมข้างต้น พบว่า เมื่อปริมาณ เซรามิกโดยปริมาตรเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ สัดส่วนผสม ระหว่างเซรามิกกับซีเมนต์เป็น 50:50 ร้อยละโดยปริมาตร พบว่าค่าโพลาริเซชันคงค้าง และ ค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง จะเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าภายนอก เพิ่มมากขึ้น

เบญญา เชิดศิริภูกร และเจียรนัย เล็กอุทัย ปีที่ 4 ฉบับที่ 25 (2016) ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล จากการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า ที่ได้จากการวัดสมบัติทางไฟฟ้าไดอิเล็กทริกของวัสดุเพอร์โรอิเล็กทริก โดยมีการจัดทำโปรแกรมวิเคราะห์ P-E loop ที่สร้างขึ้นจาก โปรแกรม Visual Studio C## นี้สามารถทำให้การ เขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้าของชิ้นงานหนึ่ง ๆ ได้ และ นามาแสดงเปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของ กราฟเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถนำกราฟวงฮีสเทอรีซิสมาคำนวณ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกได้ และสามารถนำค่าที่คำนวณมาแสดงบนหน้าจอเพื่อ เห็นการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ เมื่อเพิ่ม สนามไฟฟ้านอกจากนั้นกราฟที่แสดงบนหน้าจอ โปรแกรมยังสามารถปรับสเกลเพื่อให้เห็นรายละเอียด ของกราฟได้ด้วย ดังนั้นโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานี้จึงมี ประโยชน์อย่างยิ่งในการเรียนการสอนและงานวิจัยทางด้านการวัดค่าทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

H. DebédaC. Lucat, V. Pommier-Budinger (2016) ทำการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ในการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างโลหะโดยทำการปรับปรุงและทดสอบตัวแปรในส่วน ของลักษณะการติดตั้งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก บริเวณชั้นผิวสัมผัสระหว่างเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก กับผิววัสดุที่จะทำการ (sacrificial layer) ตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบโดยใช้วัสดุที่นำมาทำชั้น สื่อกกลางระหว่างเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกกับผิววัสดุที่คือ  $\text{SrCO}_3$ -epoxy และไม่มีชั้นสื่อกกลางระหว่าง เซ็นเซอร์และผิววัสดุ ซึ่งผลการทดลองพบว่าการใช้  $\text{SrCO}_3$ -epoxy เป็นชั้นสื่อกกลางระหว่าง เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกกับวัสดุที่จะทำการทดสอบนั้นสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ทางไฟฟ้าได้ถึง 45%

Gianluca Acciari (2018) ทำการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการหยดลงของฝนที่ตกลงมากระทบ แผ่นเพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดการสั่นสะเทือนทำให้เกิดโพลาริเซชันทางไฟฟ้าและนำสัญญาณที่ได้นั้น ส่งไปยังแผ่นควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 เพื่อทำการตรวจวัดสัญญาณและวิเคราะห์ผลซึ่ง ได้ทำการทดลองโดยการนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่นต่อเข้ากับวงจร Arduino R3 และได้ทำ การทดลองตั้งไว้ในขณะที่ฝนตกโดยที่น้ำหนักของหยดน้ำฝนอยู่ที่ 0.12 กรัมต่อหยดและมีความเร็วอยู่ที่ 1.25 เมตรต่อวินาทีซึ่งใช้เวลาในการทดลองเป็นที่แล้ว 60 นาที 90 นาที 120 นาที 300 นาที ใน 1 วันซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 3.62 โวลต์ และได้แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 1.36 โวลต์ และได้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.51-2.49 โวลต์ และได้พลังงานเฉลี่ยอยู่ที่  $P = 2.916 \times 10^{-8}$  วัตต์

Lu Wang, Jianjun Ding, Zhuangde Jiang, Guoxi Luo, Libo Zhao, Dejiang, Xiao

Yangb, Maeda Ryutaro (2019, 17 January) ทำการออกแบบกระบวนการผลิตเครื่องเก็บเกี่ยวขนาดเล็กแบบ piezoelectric (PVEH) โดยลักษณะโครงสร้างได้ทำการการออกแบบและปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบและออกแบบองค์ประกอบบล็อกลมวลหลักฐานรูปตัว L ทั้งสแตคคู่และ PZT bimorph ที่ทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์และโครงสร้างโดยรอบทำจากวัสดุ Polymethyl methacrylate (PMMA) ซึ่งทำการจับยึดสำหรับให้ความยืดหยุ่นของแผ่น piezoelectric ซึ่งช่วยลดความถี่และเพิ่มความเครียดเฉลี่ยและลดความเครียดสูงสุดและขยายช่วงความถี่ที่มีประสิทธิภาพ การประยุกต์ใช้ PZT จำนวนมากถูกใช้ในการสร้างต้นแบบ PVEH ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PVEH ที่ทำชุดตรวจจับจะสะท้อนกลับภายใต้การกระตุ้น 1 กรัม ที่ 160 Hz มีความต้านทานโหลดสูงสุด 47 k ซึ่งได้กำลังไฟสูงสุดที่ 2.49 mW ในการทดลองและแบนด์วิดท์ครึ่งกำลัง 22 Hz หลังจากทำการติดตั้งและทดลองพบว่ามีความหนาแน่นของพลังงานปริมาตรสูง 0.64 mW / cm<sup>3</sup> วัสดุที่มีปริมาตร 3.9 [cm]<sup>3</sup> (2 ซม. x 1.5 ซม. x 1.3 ซม.)

Prasertsiri Varunchittapongsa (2011) การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของช่องทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ในกระบวนการทดสอบ ซึ่งได้ใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ (Fast fouries transform, FFT) ที่ทำการแปลงจากโดเมนเวลา หรือ waveform มาอยู่ในรูปของโดเมนความถี่ หรือ spectrum ที่สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดกับเครื่องจักรได้อย่างแม่นยำซึ่งได้ใช้เครื่องเขย่าสั่นความถี่ต่างๆ  $F(t)=0.1\sin \omega t$  mmตามแนวแกน Z ที่ช่องความถี่ 40 Hz ถึง 101 Hz จำนวน 5 โหมด

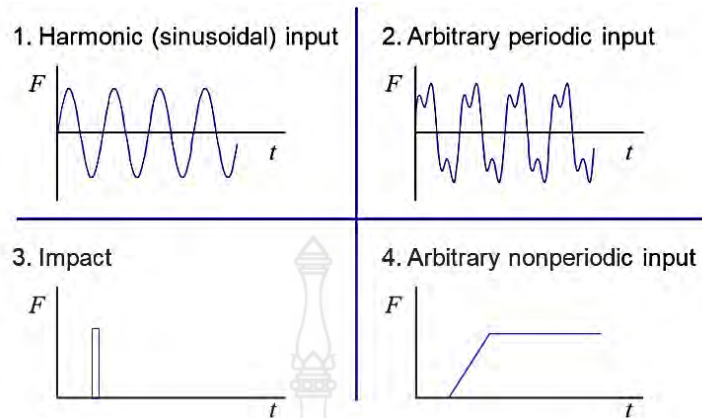
Anuwat Mankiw, (มปป.) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีลักษณะทางกายภาพสมบัติทางไฟฟ้าของ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่จะมีผลต่อการกำเนิดพลังงานและศึกษาวงจรไฟฟ้าที่จะใช้ในการ เก็บเกี่ยวพลังงานและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีผลการทดลองว่าวัสดุโพอิโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสามารถให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ เพราะแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับ compressive stress ซึ่ง stress นั้นจะแปรผันตรงกับแรงและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัว อย่าง (stress = force/area) ดังนั้นชิ้นตัวอย่างขนาดเล็กจึงเกิด stress มากกว่าชิ้นตัวอย่างขนาดใหญ่แรงกระทำที่ให้กับวัสดุนั้นแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุโพอิโซอิเล็กทริก ผลิตได้กำลังไฟฟ้าที่ได้จะมากขึ้นเมื่อ apply แรงทางกลใส่วัสดุโพอิโซอิเล็กทริกสูงขึ้น แต่ให้แรงทางกลที่สูงเกินไปจะทำให้ชิ้น PZT แตกเสียหายได้

นายนิธิพน พุทธงชัย สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2552 รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, การวัดเชิงกลด้วย LabVIEW, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. การสั่นสะเทือน (Vibration) หมายถึงการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงที่อยู่นิ่ง โดยการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุอาจจะเป็นการเคลื่อนที่โดยอิสระ หรือมีแรงบังคับตลอดเวลา ให้เคลื่อนที่ก็ได้ การสั่นสะเทือน สามารถพบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน และในงานทางวิศวกรรม ตัวอย่างการสั่นสะเทือนที่พบได้บ่อย เช่น การสั่นสะเทือนในรถยนต์ การสั่นสะเทือนจากการทำงานของเครื่องซักผ้า การสั่นสะเทือนจากการทำงานของเครื่องจักรกลเกษตร การสั่นสะเทือนจากลมพายุหรือแผ่นดินไหว

การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration) เป็นการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากพลังงานภายนอกกระทำกับระบบระหว่างการสั่นสะเทือน โดยพลังงานภายนอกที่กระทำอาจอยู่ในรูปของแรงบิด หรืออาจเป็นขจัดเพื่อบังคับให้เกิดการสั่นสะเทือน รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของพลังงานภายนอกที่ใส่ให้กับระบบ โดยรูปทางด้านซ้าย เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของกระบอกสูบ และแรงเหวี่ยงของข้อเหวี่ยง (Crank) และก้านส่่ง (Connecting rod) รูปด้านขวา พลังงานภายนอกอยู่ในรูปการใส่การขจัด โดยแสดงแบบจำลองระบบการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่เคลื่อนที่บนถนนที่ขรุขระ ความขรุขระของถนนเปรียบเสมือนการใส่การขจัดเพื่อบังคับให้ตัวรถเคลื่อนที่ขึ้นลงตามคาบความขรุขระ



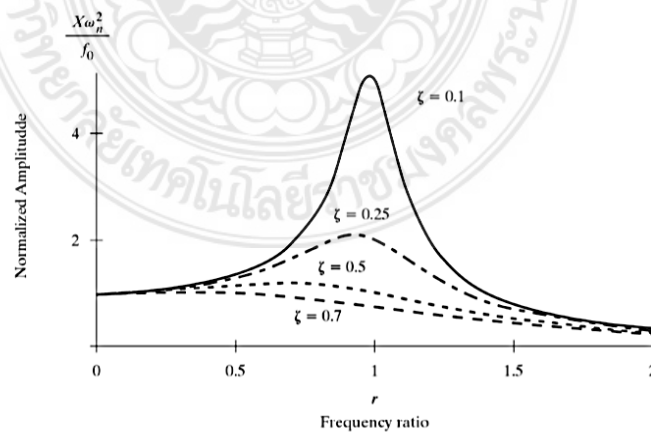
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างพลังงานภายนอกที่ใส่เข้าไปในระบบการสั่นสะเทือน (Daniel J. Inman)



รูปที่ 2.3 รูปแบบของพลังงานภายนอกที่ให้กับระบบการสั่นสะเทือน (Daniel J. Inman)

- 1) พลังงานแบบฮาร์มอนิก หรือพลังงานที่มีการแปรผันเป็นลักษณะฟังก์ชันไซน์
- 2) พลังงานที่เป็นคาบ
- 3) พลังงานจากการกระแทก หรือพัลส์
- 4) พลังงานรูปแบบใดๆและไม่มีความสัมพันธ์เป็นคาบ

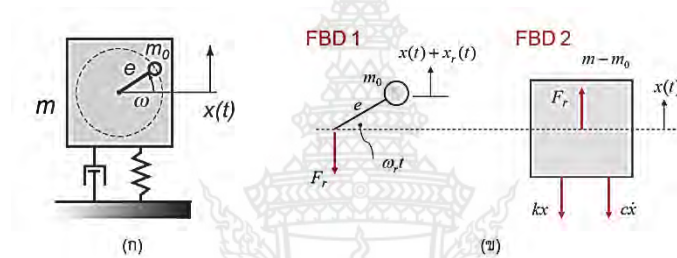
สำหรับเครื่องจักรกลที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมนั้นจะมีการทำงานเป็นคาบ โดยพลังงานที่กระตุ้นให้ระบบสั่น อาจจะมาจากการทำงานของเครื่องยนต์ หรือมอเตอร์ต้นกำลัง หรือกลไกการทำงานที่มีลักษณะเป็นคาบ เช่น ชุดเฟือง หรือลูกเบี้ยว หรืออาจเกิดจากความผิดปกติของเครื่องจักรหมุน เช่น ความไม่สมดุลของเครื่องยนต์ ความเสียหายภายในตลับลูกปืน



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่แรงกระตุ้นต่าง ๆ (Daniel J. Inman)

จากรูปที่ 2.4 หากความถี่ของแรงกระตุ้นที่แตกต่างกัน จะทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันได้ โดยหากระบบถูกกระตุ้นที่ความถี่ต่ำ ๆ ขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะใกล้เคียงกับค่าการเสียรูป เมื่อถูกแรงเท่ากันกระทำในสภาวะสมดุล (Static deformation) ขนาดการสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้นหากความถี่การกระตุ้นเพิ่มขึ้น และการสั่นสะเทือนจะมีขนาดมากเมื่อระบบถูกกระตุ้นด้วยแรงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ ปรากฏการณ์ที่ระบบถูกกระตุ้นด้วยแรงที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ จะเรียกว่าการเกิดการสั่นพ้อง (resonance)

อัตราส่วนการหน่วงต่อขนาดการสั่นสะเทือน พบว่า ยิ่งขนาดอัตราส่วนการหน่วงมาก ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อถูกแรงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติกระทำมีค่าลดลง การสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุลจากการหมุน (Rotating unbalance)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุล และ FBD (Daniel J. Inman)

- รูปที่ 2.5 (ก) โดยกลองสี่เหลี่ยมมวล  $m$  แทนเครื่องจักรที่เกิดความไม่สมดุล 4
- (ข) แสดง FBD ของระบบ

ปัญหาการสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุล สามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลองที่แสดงในรูป 2.4 (ก) โดยกลองสี่เหลี่ยมมวล  $m$  แทนเครื่องจักรที่เกิดความไม่สมดุล (มวลนี้รวมมวลที่ไม่สมดุลอยู่ด้วยกัน) โดยมวลนี้ถูกรองรับด้วยสปริง และตัวหน่วงการสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับระบบการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป ส่วนความไม่สมดุลจากการหมุนสามารถแทนได้ด้วยมวล  $m_0$  ซึ่งหมุนรอบแกนกลางของเครื่องจักร โดยตำแหน่งที่มีมวลไม่สมดุลติดอยู่เกิดที่ตำแหน่งจากจุดหมุน  $e$  (วัดตามแนวรัศมี) ส่วนความเร็วรอบการหมุนคือ  $\omega$

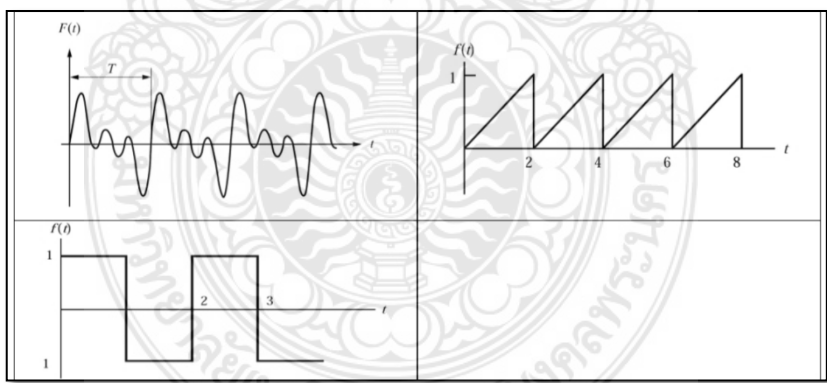
รูปที่ 2.5 (ข) แสดง FBD ของระบบในรูปที่ 2.4 (ก) เนื่องจากในที่นี่จะพิจารณาระบบที่เป็น 1 dof ซึ่งมีการสั่นสะเทือนในแนวตั้งเท่านั้น รูป FBD นี้จึงแสดงเฉพาะแรงในแนวตั้ง FBD1 แสดง FBD ของมวล ที่ไม่สมดุล  $m_0$  แรง  $F_r$  เป็นแรงคู่ปฏิกิริยาที่เครื่องจักรกระทำกับส่วนที่ไม่สมดุล ส่วน FBD2 แสดงส่วนของ เครื่องจักรโดยไม่รวมมวลที่ไม่สมดุล แรงที่กระทำกับเครื่องจักรประกอบด้วยแรง  $F_r$  ซึ่งเป็นผลจากส่วนที่ไม่สมดุล และทำให้เครื่องจักรเกิดการสั่นสะเทือน และแรงเนื่องจากสปริงและ

ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน พิกัดที่บอกการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร  $x(t)$  ส่วนการเคลื่อนที่ของมวลที่ไม่สมดุล  $m_0$  มีผลมาจากทั้งการเคลื่อนที่ ของเครื่องจักรและการเคลื่อนที่ของส่วนที่ไม่สมดุล ดังนั้นการเคลื่อนที่ของมวล  $m_0$  จึงเท่ากับ  $x(t) + x_r$  จาก FBD1 จะเขียนสมการ การเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$m_0 (\ddot{x} + \ddot{x}_r) = -F_r \tag{2.3}$$

การสั่นสะเทือนแบบบังคับจากแรงรูปแบบต่างๆ เกิดจากพลังงานภายนอกแบบฮาร์โมนิก ซึ่งเป็นรูปแบบอย่างง่าย และเป็นพื้นฐานของการพิจารณาการสั่นสะเทือนโดยพลังงานภายนอกในรูปแบบอื่นๆ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการพิจารณาการสั่นสะเทือนแบบบังคับเกิดจากพลังงานภายนอกในรูปแบบอื่นๆ โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ เริ่มจาก Part A ซึ่งกล่าวถึงการสั่นสะเทือนจากพลังงานเป็นคาบรูปแบบใดๆ หลังจากนั้นใน Part B จึงจะกล่าวถึงการสั่นแบบบังคับจากการกระแทก หรือพัลส์ (Pulse) ซึ่งผลเฉลยที่ได้ จากการกระแทกนี้ยังเป็นพื้นฐานของการพิจารณาการสั่นเนื่องจากพลังงานกระตุ้นรูปแบบใดๆ ซึ่งไม่มี ความสัมพันธ์เป็นคาบ ใน Part C การสั่นสะเทือนจากพลังงานเป็นคาบรูปแบบใดๆ

2. ลักษณะการกระตุ้นและแนวคิดในการวิเคราะห์ปัญหา เครื่องจักรกลแทบทุกชนิด ไม่ว่าจะ เป็นเครื่องยนต์มอเตอร์พัดลม ปัม หรือชิ้นส่วนกลในเครื่องจักร เช่น เฟือง โซ่ สายพาน ตลับลูก ปีน จะมีการทำงานเป็นคาบ ดังนั้นพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการ สั่นสะเทือนในเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วน เหล่านี้ จึงมีลักษณะเป็นคาบด้วย ตัวอย่างการกระตุ้นที่เป็นคาบแสดง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการกระตุ้นที่มีลักษณะเป็นคาบ (Daniel J. Inman)

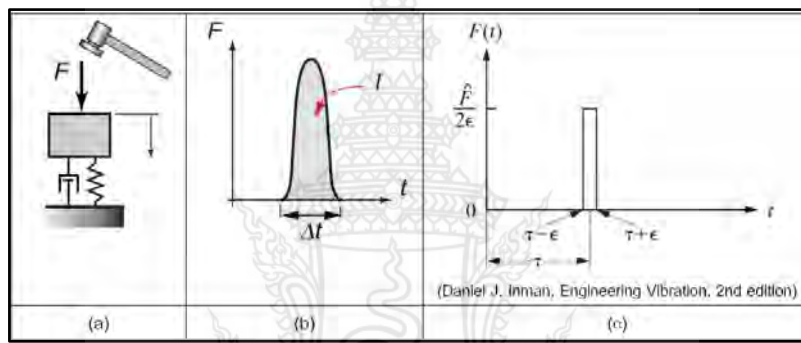
หากกำหนดให้คาบของการกระตุ้นเหล่านี้มีค่าเท่ากับ T จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน ของการกระตุ้นได้ดังสมการ

$$F(t) = F(t+T) \tag{2.4}$$



เนื่องจากฟังก์ชันที่เป็นคาบรูปแบบใดๆ ก็ตาม จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมอนันต์ของผลรวม ของฟังก์ชันไซน์ และโคไซน์ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่ที่มากระตุ้น ( $1/T$ ) ได้ตามหลักการของ อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series)

การสั้นสะเทือนจากการกระแทกหรือพัลส์ (Impulse function) การกระแทกเป็นการให้แรงในช่วงเวลาสั้นๆ เช่นการเคาะของค้อนที่ระบบการสั้นสะเทือนระบบหนึ่ง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3-3(a) หากเขียนกราฟของแรงกระทำระหว่างแรงกับเวลา จะได้กราฟดังแสดงใน รูปที่ 2.7 (b) โดยช่วงเวลาที่แรงกระทำจะเป็นเพียงช่วงสั้นๆ ส่วนขนาดแรงที่กระทำมักจะมีค่ามาก ในทาง คณิตศาสตร์ ได้จำลองแรงเนื่องจากการกระแทกในรูป 2.7 (b) ให้เป็นดังรูปที่ 2.7 (c) โดยแรงกระแทกจะ กระทำที่เวลาตั้งแต่  $\tau - \epsilon$  จนถึงเวลา  $\tau + \epsilon$  โดยขนาดของแรงกระทำในช่วงเวลานี้มีค่าคงที่เท่ากับ  $F^*/2\epsilon$



รูปที่ 2.7 การกระแทกและการจำลองการกระแทกทางคณิตศาสตร์ (Daniel J. Inman)

การวัดและการจัดการสัญญาณการสั้นสะเทือนเบื้องต้นการใช้ประโยชน์จากการทดสอบการสั้นสะเทือนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ด้านใหญ่ๆ ได้แก่

1. การทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบการสั้นสะเทือน และการตรวจสอบความถูกต้อง ของแบบจำลองการสั้นสะเทือน ในการศึกษาการสั้นสะเทือนมักจะต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อ อธิบายการสั้นสะเทือน และสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อ ทำ นายลักษณะการสั้นสะเทือนของระบบ การที่จะสามารถคำนวณ ตามสมการที่สร้างมาได้นั้นจำเป็นที่จะต้อง ทราบพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ก่อน บางพารามิเตอร์เช่น มวล ( $m$ ) อาจหาได้โดยการชั่งน้ำหนักตรงๆ เช่น ความหน่วง ( $c$ ) โมเมนต์ความเฉื่อย ( $J$ ) ค่าความแข็งเกร็ง ( $k$ ) ไม่อาจหาได้โดยง่าย จำเป็นที่จะต้อง หาจากการทดสอบการสั้นสะเทือนเมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ เหล่านี้จะทำให้สามารถทำนายลักษณะการสั้นสะเทือน ความถี่ธรรมชาติ และ Mode shapes ของการสั้นสะเทือน ซึ่งความถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติและ Mode shapes ที่คำนวณได้ ก็สามารถ ตรวจสอบได้จากการวัดการสั้นสะเทือน เช่นกัน
2. ใช้เพื่อทดสอบความแข็งแรงทนทานของผลิตภัณฑ์ เช่น การทดสอบความเสียหายจากการกระแทก การทดสอบการตกกระแทก การทดสอบความล้าจากแรงที่กระทำกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ

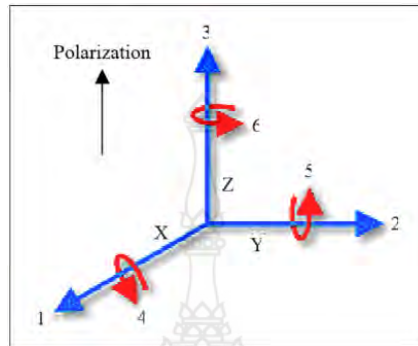
3. ใช้เพื่อตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร โดยในสภาวะการทำงานปกติ เครื่องจักรอาจมีขนาดการสั่นสะเทือน และมีความถี่การสั่นสะเทือนอยู่ค่าหนึ่ง แต่หากมีคามผิดปกติ หรือความเสียหาย เกิดขึ้นจะส่งผลให้ขนาดการสั่นสะเทือนเพิ่มสูงขึ้น และอาจเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การวัดขนาดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรโดยสม่าเสมอจึง เป็นการตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร และทำให้ ตรวจพบความเสียหายตั้งแต่ขณะเริ่มต้นได้

ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีลักษณะทางกายภาพ สมบัติ ทางไฟฟ้าของ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่จะมีผลต่อการกำเนิดพลังงานและศึกษาวงจรไฟฟ้าที่จะใช้ในการ เก็บเกี่ยวพลังงานและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีผลการทดลองว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสามารถให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ เพราะแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับ compressive stress ซึ่ง stress นั้นจะแปรผันตรงกับแรงและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง ( $\text{stress} = \text{force}/\text{area}$ ) ดังนั้นชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจึงเกิด stress มากกว่าชิ้น ตัวอย่างขนาดใหญ่แรงกระทำที่ให้กับวัสดุนั้นแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ผลิตได้กำลังไฟฟ้าที่ได้จะมากขึ้นเมื่อ apply แรงทางกลใส่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสูงขึ้น แต่ให้แรงทางกลที่สูงเกินไปจะทำให้ชิ้น PZT แตกเสียหายได้

รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ขำนิประศาสน์, การวัดเชิงกลด้วย LabVIEW, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. โปรแกรม LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรม คอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการจัดการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม ซึ่งเป็น โปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) นั้น คือผู้ใช้พัฒนาโปรแกรมไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือ คำสั่งใดๆ ทั้งสิ้น และภาษาที่ใช้ในโปรแกรมจะเรียกว่าเป็น ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดภาษาพื้นฐาน เช่น C, BASIC หรือ FORTRAN ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด โดยจะช่วยอำนวยความสะดวกและสามารถลดเวลาในการ เขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น Port หรือ Card ต่างๆ รวมถึงการจัดวางตำแหน่งในหน่วยความจำเพื่อที่จะสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ ในการคำนวณและเก็บข้อมูลให้ได้ประโยชน์สูงสุด

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) เครื่องหมายแสดงสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมักจะมีตัวเลข 2 ตัว ห้อยข้างหลังตั้ง ตัวเลขที่ห้อยตัวหน้าบอกทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ apply เข้าไปใน วัสดุหรือที่วัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนตัวเลขห้อยตัวหลังแสดงทิศทางที่วัสดุ เพียโซอิเล็กทริกยึดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำหรือทิศทางที่ apply แรงทางกล กระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทาง

polarization ดังแสดง ในรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นว่าทิศทางหมายเลข 3 เป็นแกน z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำ (pole) ให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ แกนของผลึกที่เหลือคือ x และแกน y แทนด้วยทิศทางหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังรูปที่ 2.7 ส่วนหมายเลข 4 5 และ 6 หมายถึงแรงเฉือนรอบ ๆ แกน x y และ z ตาม ลำดับ



รูปที่ 2.8 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

Electromechanical coupling factor ( $k$ )

เป็นสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่เป็นตัวชี้บอก (indicator)

ความสามารถ ในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ค่าจำกัดความ ของ  $k$  ในรูปสมการคือ

$$k^2 = \frac{\text{energy electrical to convert energy mechanical}}{\text{input mechanical energy}} \quad (2.5)$$

หรือ

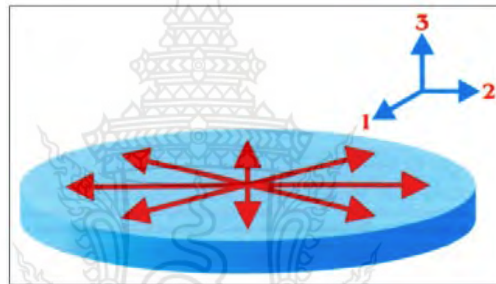
$$k^2 = \frac{\text{electrical energy convert to mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} \quad (2.6)$$

วัสดุไพโซอิเล็กทริกต่างชนิดกันมี  $k^2$  ต่างกัน วัสดุที่มี  $k$  มากจะมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งได้มาก แต่ค่าของ  $k$  ไม่ใช่ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานเพราะสมการคำนวณ  $k$  ไม่ได้คำนึงถึง พลังงานที่สูญเสียเมื่อเปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง ถ้าจะหาประสิทธิภาพ การเปลี่ยนพลังงานต้องหาจากสมการต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน} = \frac{k^2}{(k^2 + D)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $D$  คือ dissipation factor ด้าน input ค่า  $k$  ของวัสดุใด ๆ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุนั้น ๆ เพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับ การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (poling) และทิศทางของแรงเชิงกลหรือกระแสไฟฟ้าด้วย ดังนั้น นักเซรามิกจึงแสดง  $k$  ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น  $k_{15}$   $k_{33}$   $k_{31}$

อนึ่งสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกที่มีรูปทรงแบนเหมือนเหรียญที่ถูก pole ตามความหนา (ขนานกับแกน  $z$ ) และเมื่อนำไปจ่ายกระแสไฟฟ้าขนานกับแกน  $z$  แล้วเกิดการยืดหรือหดตัว ตามแนวรัศมีในแกน  $x$  และแกน  $y$  ดังรูปที่ 5 นิยมแสดง  $k$  ในรูปของ planar electromechanical coupling factor หรือบางที่เรียกย่อ ๆ ว่า planar coupling factor ( $k_p$ ) ซึ่ง Institute of Radio Engineer (IRE) ได้กำหนดวิธีหาค่า  $k_p$  ใน IRE Standards on Piezoelectric Crystals, (1957; 1961)



รูปที่ 2.9 การสั่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นไพโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

Young's modulus

หาก apply stress ลงบนของแข็งทั่วไปจะเกิด strain เพียงอย่างเดียว ความสัมพันธ์ระหว่าง stress (T) กับ strain (S) คือ

$$T = YS \quad (2.8)$$

เมื่อ Y คือ Young's modulus มีหน่วยเหมือน stress แต่ถ้า applied stress ลงบนของแข็งที่เป็นวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกจะเกิดทั้ง strain และประจุไฟฟ้า

Piezoelectric Charge Constant ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุมีความสัมพันธ์กับ stress ที่ apply ดังสมการ

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.9)$$

เมื่อ Q = ประจุไฟฟ้าที่สะสม

A = พื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ )

T = stress ( $N/m^2$ )

d = piezoelectric strain constants (C/N)

D = dielectric displacement ( $C/m^2$ )

ในทางตรงกันข้ามถ้า apply สนามไฟฟ้าใส่บนวัสดุจะเกิด strain ทำให้วัสดุเกิดการขยายและหดตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าซึ่ง strain ที่เกิดจะแปรตามขนาดของ สนามไฟฟ้าดังสมการความสัมพันธ์ 2.10

$$S = dE \quad (2.10)$$

เมื่อ S = strain

E = Electric field strength (V/m)

d = Piezoelectric strain constant (meters/volt)

ดังนั้น d มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (2.11)$$

วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำเครื่องมือที่ต้องสั่นตัวมากหรือขยับตัวมาก เช่น sonar ultrasonic cleaner และหม้อแปลงจะต้องมีค่า d มาก ๆ นอกจากนี้ยังมี piezoelectric constant อีกตัวหนึ่ง คือ piezoelectric voltage constant (g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ d ดังสมการ

$$g = \frac{d}{\epsilon'} = \frac{d}{K' \epsilon_0} \quad (2.12)$$

โดยที่ g มีหน่วยเป็น (g)

$$\frac{\text{volt/meter}}{\text{newton/meter}^2} = \frac{\text{meter x volt}}{\text{newton}} \quad (2.13)$$

ประจุและพลังงาน

ประจุทั้งหมด (สัญลักษณ์ Q) ที่เก็บในตัวเก็บประจุหาได้จาก:

$$Q = C \times V \quad (2.14)$$

Q= ประจุหน่วยเป็น หน่วยคูลอมป์ (c)

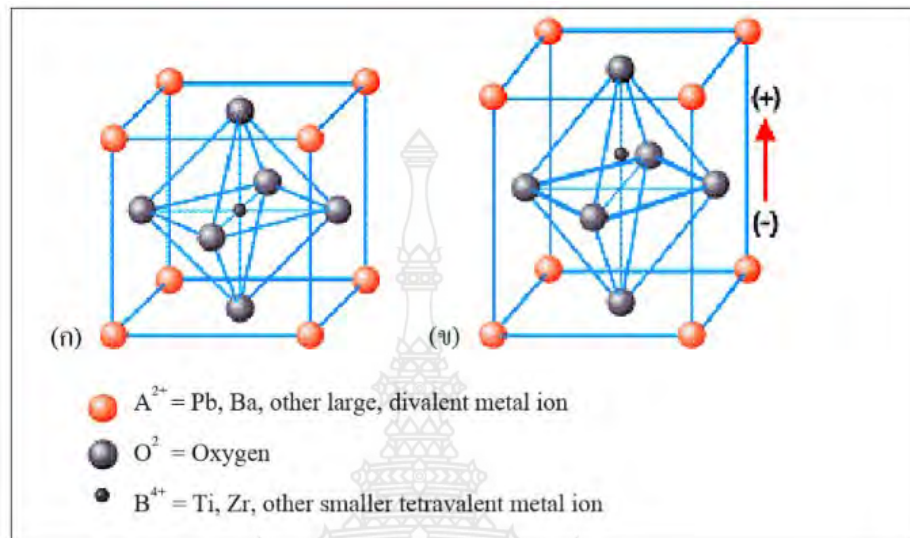
C=ค่าความสามารถเก็บประจุ หน่วยฟารัด (F)

V=แรงดัน หน่วย โวลต์ (V) ประจุและพลังงาน

$$E = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.15)$$

E = พลังงานหน่วยเป็นจูล (J)

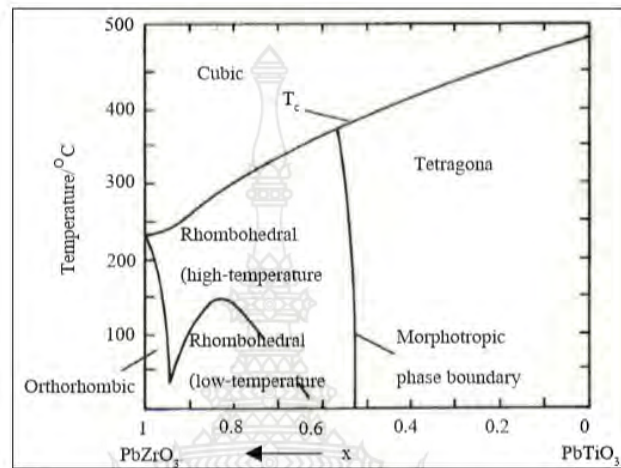
วัสดุไพโรอิเล็กทริกทางการค้าที่สำคัญ แบบเรียมไททาเนต มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{BaTiO}_3$  เป็นไพโรอิเล็กทริกเซรามิกตัวแรกที่ทำออกมาขาย และใช้กันอย่างแพร่หลาย  $\text{BaTiO}_3$  มีโครงสร้างแบบ perovskite ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งพบในสารประกอบหลาย ๆ ชนิดที่มีสูตรเคมีเป็น  $\text{ABO}_3$



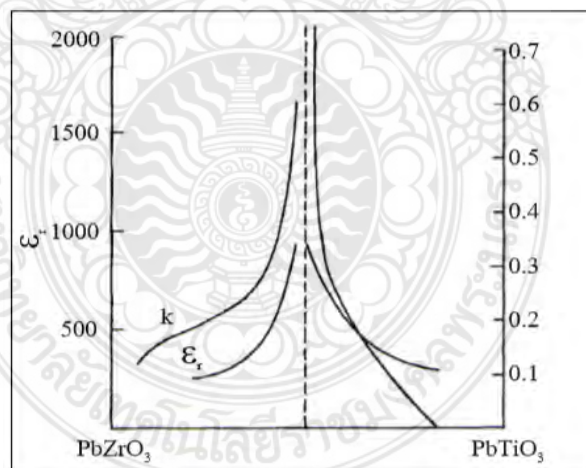
รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของวัสดุไพโรอิเล็กทริก (ก) อุณหภูมิสูงกว่า Curie point ( $T_c$ ) (ข) อุณหภูมิต่ำกว่า Curie point (APC International, 2002)

Lead zirconate titanate (PZT) เกิดจากการนำ  $\text{PbTiO}_3$  ( $T_c = 475^\circ\text{C}$ ) กับ  $\text{PbZrO}_3$  ( $T_c = 234^\circ\text{C}$ ) มาผสมกัน เมื่อ  $\text{PbTiO}_3$  เย็นตัวผ่าน  $T_c$  แล้ว  $\text{PbTiO}_3$  จะเปลี่ยนโครงสร้างจาก cubic ไปเป็น tetragonal ที่มีความยาว ด้านแกน z ยาวกว่าแกน x และ y ถึง 6% การแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้มี internal stress ในชิ้นงาน สูงมาก ชิ้น  $\text{PbTiO}_3$  บริสุทธิ์ที่เย็นตัวผ่าน  $T_c$  ลงมา มักจะแตกร้าวแต่เมื่อ  $\text{PbZrO}_3$  เย็นตัวผ่าน  $T_c$  จะทำให้  $\text{PbZrO}_3$  เปลี่ยนโครงสร้างจาก cubic ไปเป็น orthorhombic ที่มีสมบัติแบบ antiferroelectric เพราะโพลาไรเซชันที่เกิดจากการหนีศูนย์กลางของ  $\text{Zr}^{2+}$  จะหันทิศสลับกันจนหักล้างกันไปหมด เมื่อนำ  $\text{PbTiO}_3$  กับ  $\text{PbZrO}_3$  มารวมกันในสัดส่วนต่างๆ จะได้  $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  ที่มีวิวัฒนาการเปลี่ยนจาก tetragonal เป็น orthorhombic โดยที่ขอบเขตของวิวัฒนาการ (phase boundary) บริเวณนี้เกือบจะเป็นเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแกน x แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงวิวัฒนาการข้างต้นนี้เกิดขึ้นได้ทุกช่วงอุณหภูมิ เรียกช่วงบริเวณนี้ว่า morphotropic phase boundary (MPB) เป็นช่วงที่ PZT เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ช่วงบริเวณนี้ PZT จะมีสมบัติไพโรอิเล็กทริกสูงสุดดังแสดงในภาพ 2.11 นักวิจัยเชื่อว่าสาเหตุที่ PZT มีสมบัติ ไพโรอิเล็ก

เล็กทริกสูงสุดในช่วง MPB เพราะว่าช่วงนี้ PZT เกิดอยู่ในรูป 2 วัฏภาค คือ tetragonal กับ rhombohedral ซึ่งมีโพลาริเซชัน 6 และ 8 ทิศทางตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำไป pole จึงจัดเรียงโดเมนตามทิศที่ pole ได้มากจึงแสดงสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกได้มากขึ้น PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมัก จะมีส่วนประกอบทางเคมีที่ MPB



รูปที่ 2.11 วัฏภาคที่เสถียรของ  $Pb(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Jaffe et al.,1971)



รูปที่ 2.12 Relative permittivity ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกบริเวณ morphotropic phase boundary (MPB) (Moulson and Herbert, 2003)



วัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่นิยมใช้ในเชิงการค้าและอุตสาหกรรม

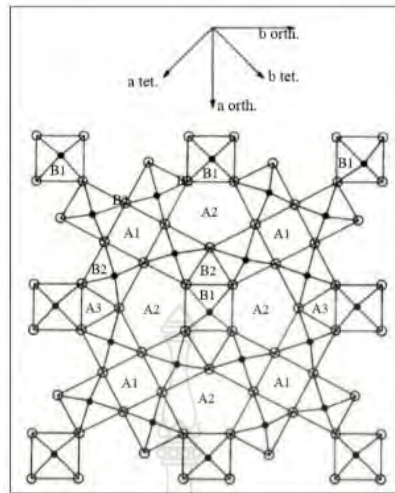
1. PZT-4 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า hard PZT เป็น PZT ที่ทำขึ้นโดยการ dope PZT ด้วย Sr มีสูตรเคมีว่า  $(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  PZT ชนิดนี้มี dielectric loss ต่ำและทนทานต่อการ depole ได้สูงถึงแม้จะถูกกระทำด้วยแรงทางกลสูงก็ไม่ depole ดังนั้นจึงมักจะนำ PZT ชนิดนี้ไปใช้ทำ acoustic transducer สำหรับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำลึก ๆ และใช้ทำเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เช่น ที่จุดเตาแก๊ส

2. PZT-5A มีสูตรทางเคมี  $(\text{Pb}_{0.988}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})_{0.976}\text{Nb}_{0.024})\text{O}_3$  มีคุณสมบัติที่ดี คือ - high sensitivity คือ สภาพไวสูง - high time stability คือ คุณสมบัติไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามเวลา (aging ต่ำ) - electrical resistivity คือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังนั้นจึงมักถูกใช้ทำ hydrophone

3. PZT-5H มี sensitivity และ dielectric constant สูงกว่า PZT-5A มี Tc ต่ำจึงถูกใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงและไม่ค่อยทนอุณหภูมิสูง

4. PZT-8 มีคุณสมบัติคล้ายๆ PZT-4 แต่มี dielectric loss ต่ำกว่ามากและทนทานต่อการ depolarization มากกว่านอกจากนี้ PZT-8 ยังมี dielectric constant (K') และ coupling factor (k) ที่ต่ำกว่า PZT-4 2000

Tungsten Bronze Structure Compound เป็นสารประกอบที่มีสูตร  $[(\text{A}1)_2(\text{A}2)_4][(\text{B}1)_2(\text{B}2)_2]\text{O}_{30}$  เมื่อ A เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนต่ำ เช่น  $\text{Pb}^{2+}$  ส่วน B เป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสูง เช่น  $\text{W}^{4+}\text{Ta}^{4+}\text{Nb}^{5+}\text{Ti}^{4+}$  ตัวอย่างสารประกอบพวกนี้ เช่น  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$  โดยทั่วไปสารประกอบพวกนี้มีโครงสร้างผลึกแบบ Tungsten Bronze Structure ซึ่งเป็นโครงสร้างของสารประกอบระหว่างโลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) กับ tungsten oxide เช่น  $\text{K}_{5.7}\text{W}_{10}\text{O}_{30}$  ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 6.3 จากรูปจะเห็นว่า B ไอออน จะจับกับออกซิเจนเป็น octahedron ซึ่งมี 2 ชนิด คือ octahedron ของ B1 กับ octahedron ของ B2 ต่อ จากนั้น octahedron จะจับต่อกันเป็นโครงสร้างที่มีช่องว่างเป็นทางยาว (tunnels) 3 แบบ คือ แบบ A1 มี  $\text{O}^{2-}$  ไอออนล้อมรอบ 4 ตัว แบบ A2 เป็นช่องใหญ่สุดมี  $\text{O}^{2-}$  ล้อมรอบ 5 ตัว และแบบ A3 เป็น ช่องเล็กที่สุดมี  $\text{O}^{2-}$  ล้อมรอบ 3 ตัว ปกติช่อง A3 ไม่มีไอออนไปอยู่ยกเว้นแต่สารประกอบมีไอออนขนาดเล็กมาก ๆ



รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของ Tungsten bronze (Moulson and Herbert, 2003)



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ใช้ในการทดลอง

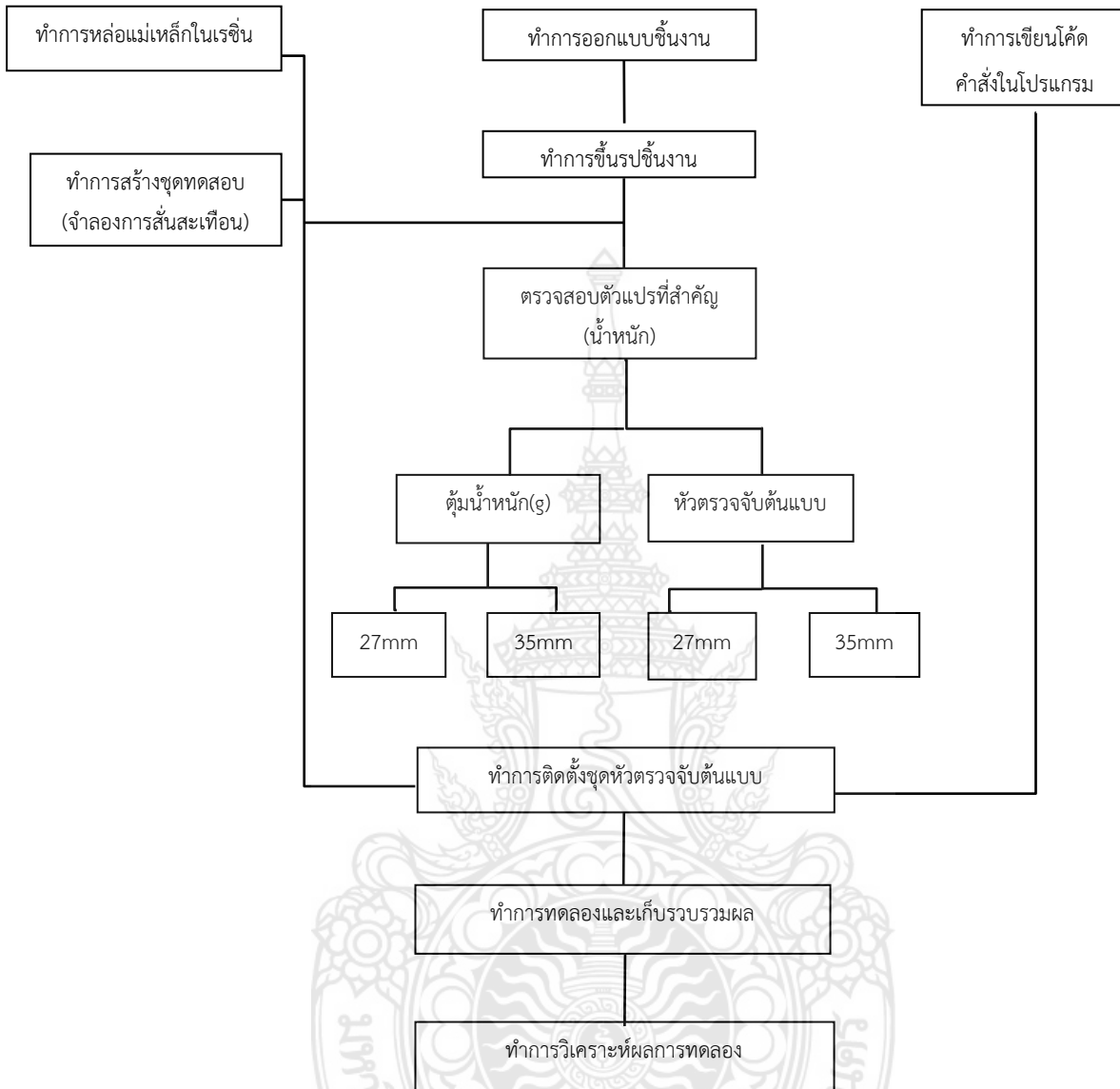
อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Piezo speaker element 27 mm	Murata	7BB-27-4L0
Piezo speaker element 35 mm	Murata	7BB-35-3CL0
Microcontroller	Arduino SRL	Uno R3
sensor module	KEYES	Vibration Sensor Module
Submersible Pump 50W	SOBO	WP 4550
Steel bucket	-	Capacity 50 liter
Vibration probe	-	-
Magnet	Butterfly Marketing Co.,Ltd	AC000192MAGNET 25x5 mm
EpoxyCure Resin	Buehle	20-3432-032
EpoxyCure Hardener Resin	Buehle	20-34-128

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Mold Pvc	Buehle	Dia.30 mm
linear Precision saw	Buehle	Met 5000
Electricwire	-	T-67
soldering iron 20W/130W	HAKKO PRESTO	No.981
soldering lead	ULTRACORE	B425
multimeter	UNI-T	UT30B
เครื่องซิงน้ำหนัก	-	SF-400A
Laptop	DELL	inspiron3437



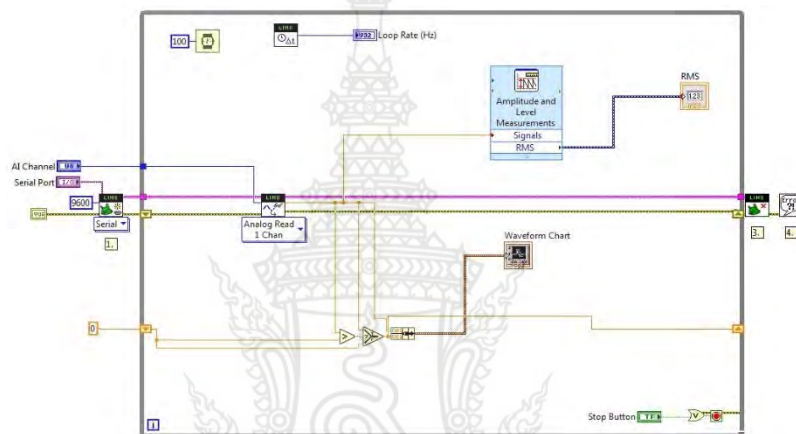
### 3.2 วิธีการทดลอง



รูปภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองในการทดสอบการเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานจากวัสดุPZT

### 3.2.1 ขั้นตอนเขียนโค้ดคำสั่งในโปรแกรม LabVIEW 2017

ขั้นตอนการออกแบบการเขียนคำสั่งในรูปแบบของไอคอนที่เป็นรูปภาพหรือเป็น subvi. โดยเชื่อมต่อกันผ่าน wire เพื่อการเชื่อมต่อของสัญญาณคำสั่งที่เข้ามาทาง analog input ไปยัง subvi. ต่างๆ ในที่นี้การออกแบบของโค้ดมีการออกแบบในการรับสัญญาณแบบ analog โดยมีการเลือกช่องสัญญาณที่เข้าได้เช่นในการทดลองครั้งนี้ผู้ศึกษาวิจัยตั้งค่าให้สัญญาณรับค่าอินพุตที่ขา A0 และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของ Half-Wave Rectifiers ในแต่ละช่วงเวลาในโดเมนของเวลาที่เท่าๆกันและมีการออกแบบให้บอกถึงแรงดันสูงสุดหรือค่าแอมพิจูดที่สูงที่สุดของสัญญาณนั้นๆ จากนั้นผู้วิจัยได้ตั้งค่าให้สามารถเก็บหรือบันทึกข้อมูลของสัญญาณในช่วงเวลาต่างๆ และสามารถนำสัญญาณออกมาวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นที่แตกต่างกันได้



(ก)

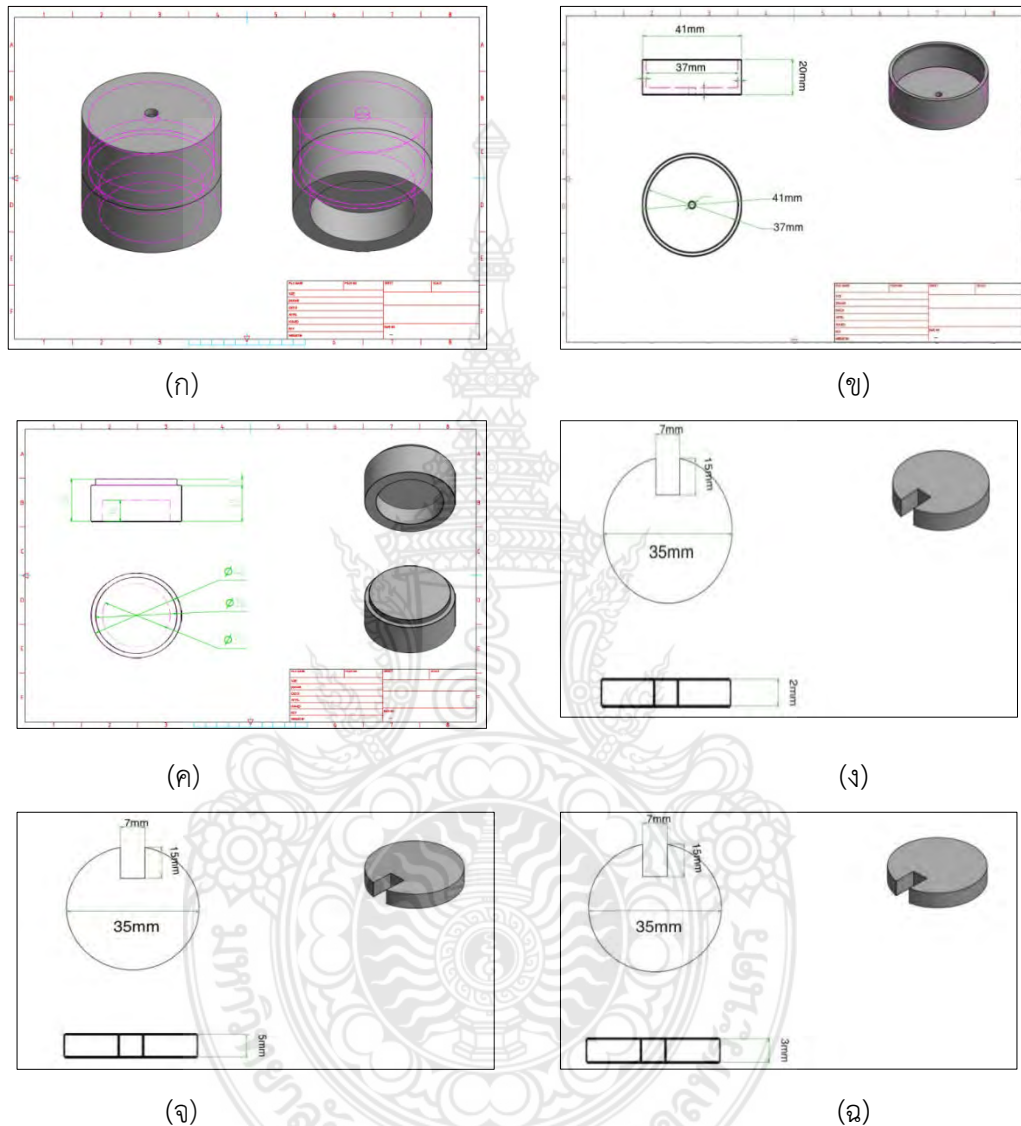


(ข)

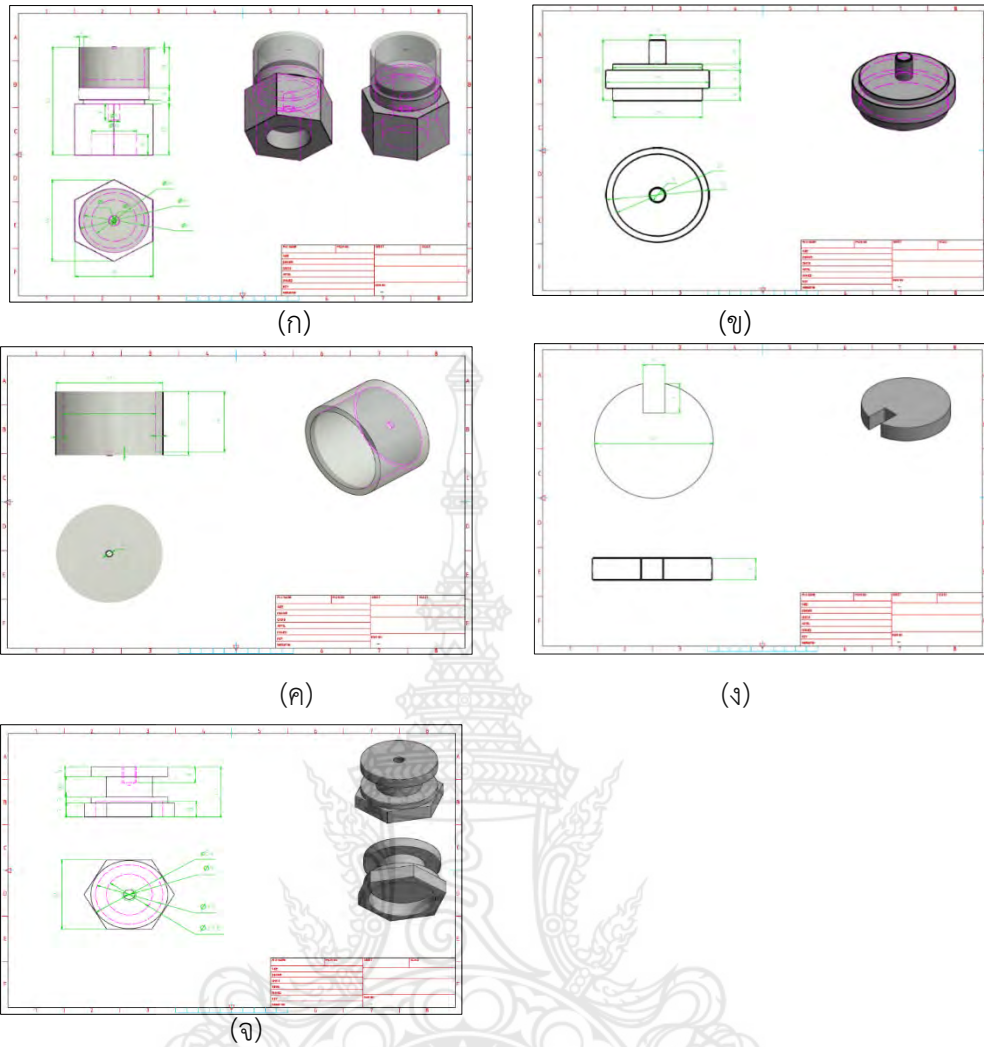
รูปภาพที่ 3.2 ขั้นตอนเขียนโค้ดคำสั่ง (ก) block diagram คำสั่งของโค้ดในโปรแกรม LabVIEW (ข) front panel หน้าต่างที่ใช้แสดงค่า

### 3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบหัวตรวจจับต้นแบบด้วยโปรแกรม Autodesk inventor 2016

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการออกแบบหัวตรวจจับต้นแบบที่จะนำไปติดตั้งแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 27 และ 35 มิลลิเมตร และทำการออกแบบให้น้ำหนักรวมของหัวตรวจสอบมีตัวแปรของน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อทำการเปรียบเทียบ



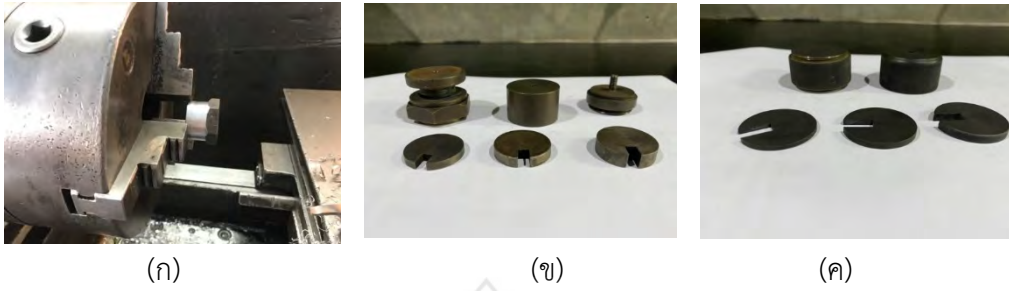
รูปภาพที่ 3.3 หัวตรวจจับการสั่นสะเทือนขนาดสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35mm (ก) แบบประกอบระหว่างฝาครอบนอกและฐาน (ข) ฝาครอบด้านนอก (ค) ฐานสำหรับวาง PZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง35mm เพื่อติดกับอุปกรณ์ (ง) ต้มน้ำหนักที่1 15.5g (จ) ต้มน้ำหนักที่2 20.4g (ฉ) ต้มน้ำหนักที่3 29.4g



รูปภาพที่ 3.4 หัวตรวจจับการสั่นสะเทือนขนาดสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27mm  
 (ก) แบบประกอบระหว่างฝาครอบบนกับฐานล่าง (ข) แขนกลางสำหรับเชื่อมต่อ  
 ระหว่างฐานกับฝาครอบด้านบน (ค) ฝาครอบด้านบน (ง) ตั้มน้ำหนักที่ 15.4g 21.3g  
 29.4g ตามลำดับ (จ) ฐานล่างสำหรับติดกับอุปกรณ์



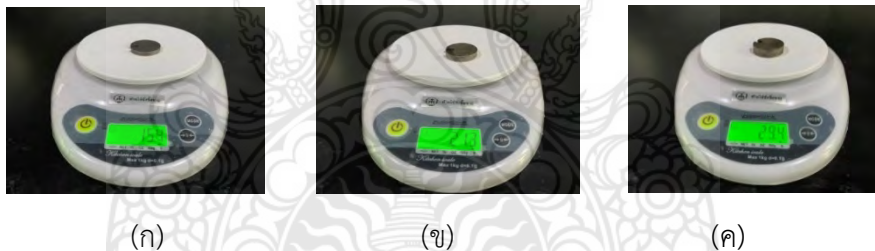
### 3.2.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบหัวตรวจจับต้นแบบโดยวิธีการกลึง



รูปภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน(ก)ขั้นตอนระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานหัวตรวจจับต้นแบบ (ข)ชิ้นส่วนประกอบของหัวตรวจจับสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27mm (ค) ชิ้นส่วนประกอบของหัวตรวจจับสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35mm

### 3.2.4 ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักตัวแปรของตุ้มน้ำหนักแต่ละขนาด

ขั้นตอนการตรวจสอบตัวแปรที่สนใจในส่วนของน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักของขนาดที่ใช้กับเซนเซอร์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรของน้ำหนักที่ใช้คือที่น้ำหนักทั้งหมด 3 ค่าคือที่ขนาดน้ำหนัก 15 g , 21 g และ 29 g โดยที่น้ำหนักของตุ้มเซนเซอร์ทั้งสองขนาดจะต้องมีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน



รูปภาพที่ 3.6 ขั้นตอนที่ชั่งน้ำหนักตัวแปรของตุ้มน้ำหนักสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 mm (ก)ตุ้มน้ำหนักที่1 15.4g (ข)ตุ้มน้ำหนักที่2 21.3g (ค)ตุ้มน้ำหนักที่3 29.4g



รูปภาพที่ 3.7 ขั้นตอนที่ชั่งน้ำหนักตัวแปรของตุ้มน้ำหนักสำหรับPZTขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm (ก)ตุ้มน้ำหนักที่1 15.5g (ข)ตุ้มน้ำหนักที่2 20.4g (ค)ตุ้มน้ำหนักที่3 29.3

### 3.2.5 ขั้นตอนหล่อแผ่นแม่เหล็กในเรซินและทำการติดตั้งเข้ากับต้นแบบหัวตรวจสอบ

ทำการเตรียมโมลพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง30มิลลิเมตรและทำการทาสารหล่อขึ้นบริเวณรอบๆด้านในโมลพีวีซีเพื่อให้งานต่อการแกะชิ้นงานออกจากโมลหลังจากขึ้นงานเซตตัวและขั้นตอนต่อไปนำแผ่นแม่เหล็กไปวางไว้บริเวณกึ่งกลางโมลพีวีซีเพื่อรอการนำสารมาเทลงไปโดยทำการผสม Epoxy resin และ Epoxy hardener ในอัตราส่วน 4 ต่อ1 ตามลำดับใส่แก้ว จากนั้นทำการคนสารทั้งสองชนิดนี้ให้ผสมรวมกันซึ่งการคนนั้นจำเป็นต้องระวังเรื่องฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นระหว่างคนสาร หลังจากนั้นเทสารลงในโมลพีวีซีและรอเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงในการเซตตัวแข็งของ resin



(ก)



(ข)

รูปภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการหล่อแผ่นแม่เหล็ก (ก) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหล่อเรซินประกอบด้วย Epoxy Resin, Epoxy Hardener แผ่นแม่เหล็ก โมลสำหรับหล่อชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง30mm ครีมนิวาสลีน (ข) ชิ้นงานหลังจากทำการหล่อเรซินกับแม่เหล็กที่เวลา8ชั่วโมง ขั้นตอนหลังจากเรซินแข็งตัวเป็นขั้นตอนการตัดเรซินด้วยเครื่องตัดละเอียดโดยทำการวัดขนาดของเรซินที่จะนำไปติดตั้งกับหัวตรวจสอบต้นแบบทั้งสองแบบ และทำการนำเรซินไปล็อคไว้กับตัวจับชิ้นงานและทำการเปิดเครื่องตัดละเอียดที่ใช้ในการตัดเรซินซึ่งระยะเวลาในการตัดเรซินจะใช้เวลาทั้งหมดขึ้นละครึ่งชั่วโมง



(ก)



(ข)

รูปภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการตัดแต่งเรซิน (ก) ขั้นตอนติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องตัดชิ้นงานแบบละเอียด (ข) การติดตั้งชิ้นงานเรซินเข้ากับตัวจับชิ้นงาน

### 3.2.6 ขั้นตอนการจำลองการทดสอบการสั่นสะเทือน

ขั้นตอนการจำลองการสั่นสะเทือนโดยจะนำมอเตอร์ขนาดกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ เป็นตัวกำเนิดสัญญาณของการสั่นสะเทือนและติดตั้งไว้บนถังเหล็กขนาดความจุที่ 50 ลิตร โดยจะมีการจำลองความผิดปกติของมอเตอร์โดยการนำชิ้นส่วนที่เสียหายของแกนไปพัดหมุนไปติดตั้งกับมอเตอร์และเปรียบเทียบกับใบพัดที่ไม่เกิดความเสียหายเพื่อที่จะใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการจับความผิดปกติของสัญญาณที่ได้จากการสั่นที่ผิดปกติไปจากเดิม

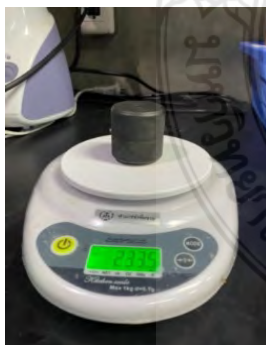


(ก)

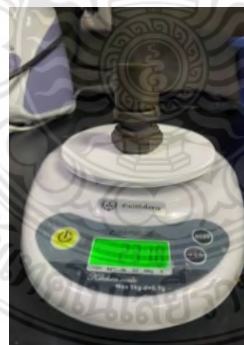
รูปภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการจำลองการทดสอบ(ก) ขั้นตอนการสร้างการจำลองการสั่นสะเทือน

### 3.2.7 ขั้นตอนการประกอบชุดตรวจหัวตรวจจับต้นแบบเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ขั้นตอนนี้จะทำการประกอบแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเข้ากับหัวตรวจสอบต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้ซึ่งก่อนที่จะทำการประกอบผู้ศึกษาได้ทำการตรวจสอบน้ำหนักของหัวตรวจสอบที่ใช้ทั้งสองขนาดว่ามีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันหรือไม่หลังจากนั้นทำการบัดกรีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกและทำการประกอบแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเข้ากับหัวตรวจสอบต้นแบบตามรูปภาพ



(ก)



(ข)

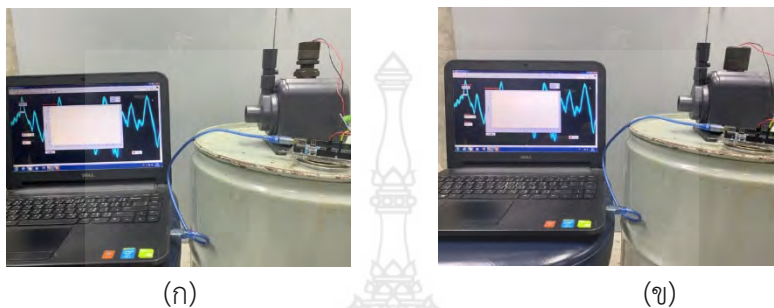


(ค)

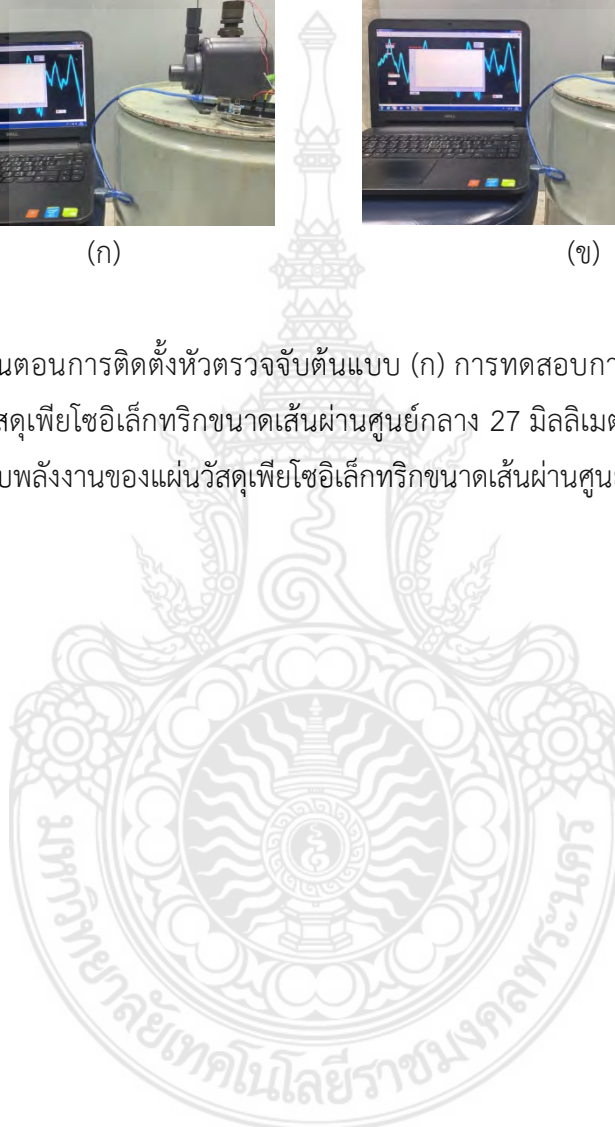
รูปภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักระบบของหัวตรวจจับต้นแบบ (ก) ชั่งน้ำหนักหัวตรวจจับต้นแบบสำหรับPZT ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35mm ที่น้ำหนัก 233.5g (ข) ชั่งน้ำหนักหัวตรวจจับต้นแบบสำหรับPZT ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27mm ที่น้ำหนัก 231.8g (ค) รูปประกอบหัวตรวจสอบ

### 3.2.8 ขั้นตอนการติดตั้งชุดหัวตรวจจับต้นแบบเข้ากับชุดจำลองการสั่นสะเทือน

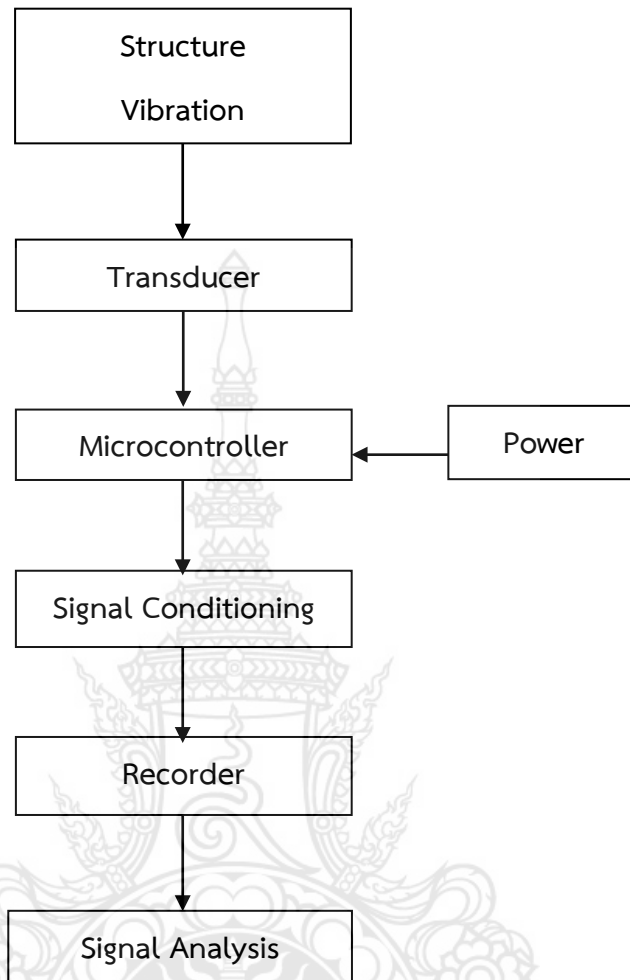
ขั้นตอนนี้ได้นำเอาหัวตรวจสอบต้นแบบไปติดไว้บนถังเหล็กบริเวณที่ใกล้กับมอเตอร์และทำการติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับบอร์ดควบคุมและต่อกับ laptop เพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับบอร์ดควบคุมที่อ่านค่าและรวบรวมข้อมูลเพื่อที่จะนำมาแสดงผลของสัญญาณในโปรแกรม LabVIEW ในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าแบบ Half-Wave Rectifier



รูปภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการติดตั้งหัวตรวจจับต้นแบบ (ก) การทดสอบการดูดซับพลังงานของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร (ข) การทดสอบการดูดซับพลังงานของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร

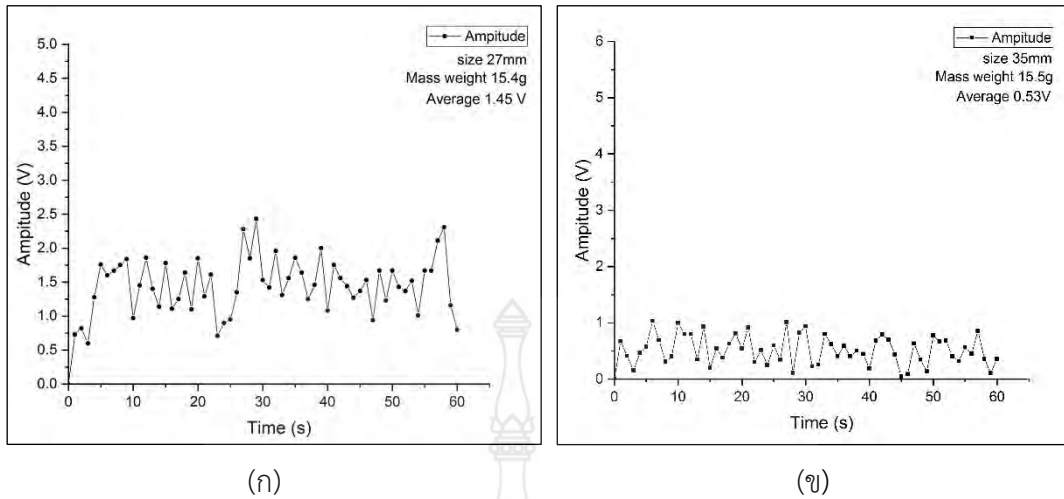


## 3.2.9 ขั้นตอนการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลตามตัวแปรที่สนใจ



รูปภาพที่ 3.13 ตารางแสดงขั้นตอนการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลตามตัวแปรที่สนใจ

### 3.2.10 ขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะของการสั่นสะเทือนจากกราฟของสัญญาณจากการสั่นสะเทือน



รูปภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์(ก) กราฟแสดงขนาดที่ตรวจจับการสั่นสะเทือนที่ได้จากหัวตรวจจับต้นแบบที่PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 mm (ข) กราฟแสดงขนาดที่ตรวจจับได้จากหัวตรวจจับต้นแบบที่ PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm

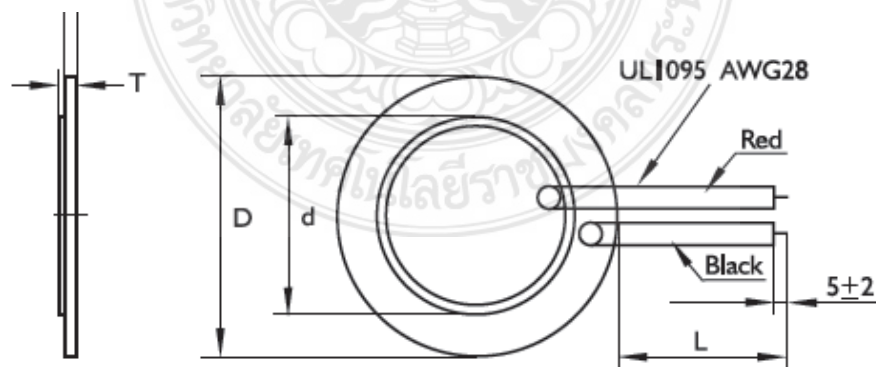
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาลักษณะของสัญญาณที่มีผลจากตัวแปรภายนอก

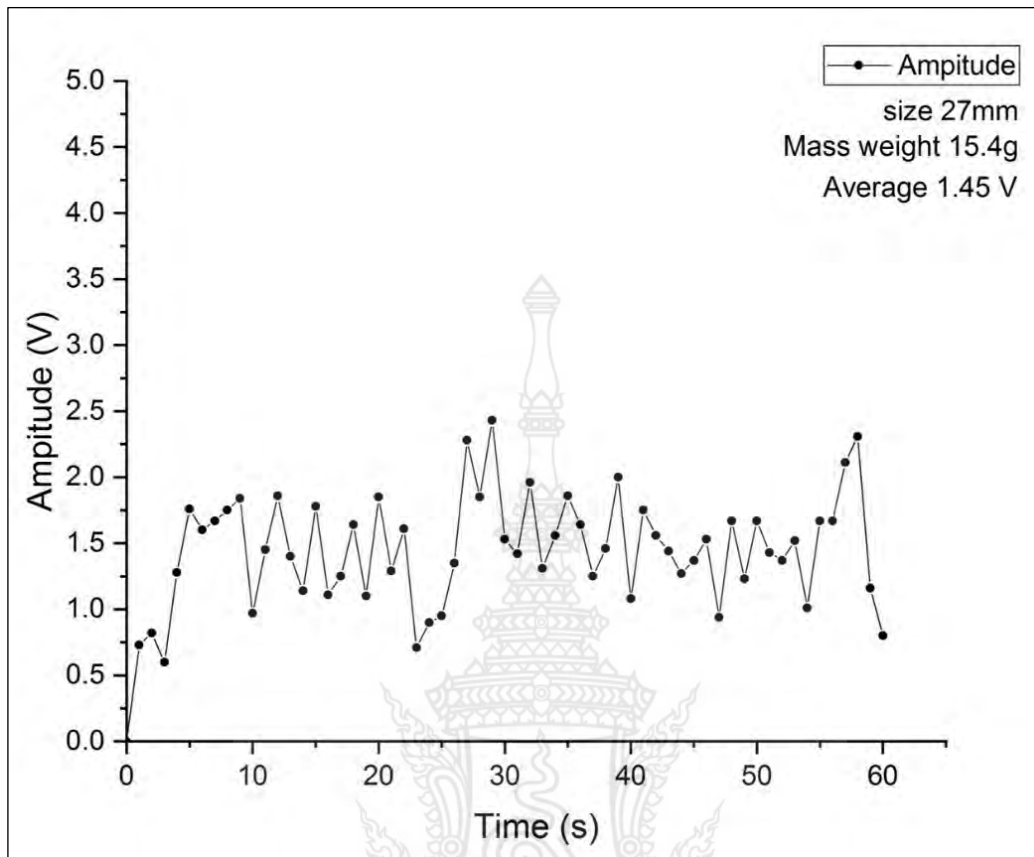
ตัวแปรที่สำคัญ	PZT 27mm	PZT 35mm
Capacitance $\pm 30\%$ (F)	20000pF	37000pF
Dimensions $D \pm 0.1$ (mm)	27	35
Dimensions $d \pm 0.3$ (mm)	20	25
Dimensions $t \pm 0.02$ (mm)	0.3	0.25
Dimensions $T \pm 0.1$ (mm)	0.52	0.51
Rate max voltage (Vp-p square wave)	30Vp-p	30Vp-p
Resonant frequency (Hz)	4200 $\pm$ 500	2800 $\pm$ 300
Operating temperature ( $^{\circ}$ C)	-20 - + 60	-20 - +60
Storage temperature ( $^{\circ}$ C)	-20 - +70	-20 - +70
Mass weight 1 (g)	15.4	15.5
Mass weight 2 (g)	21.3	20.4
Mass weight 3 (g)	29.4	29.3

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่สำคัญของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



รูปภาพที่ 4.1 ลักษณะของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PZT (Murata)

#### 4.2. การศึกษาลักษณะสัญญาณจากแผ่นPZT

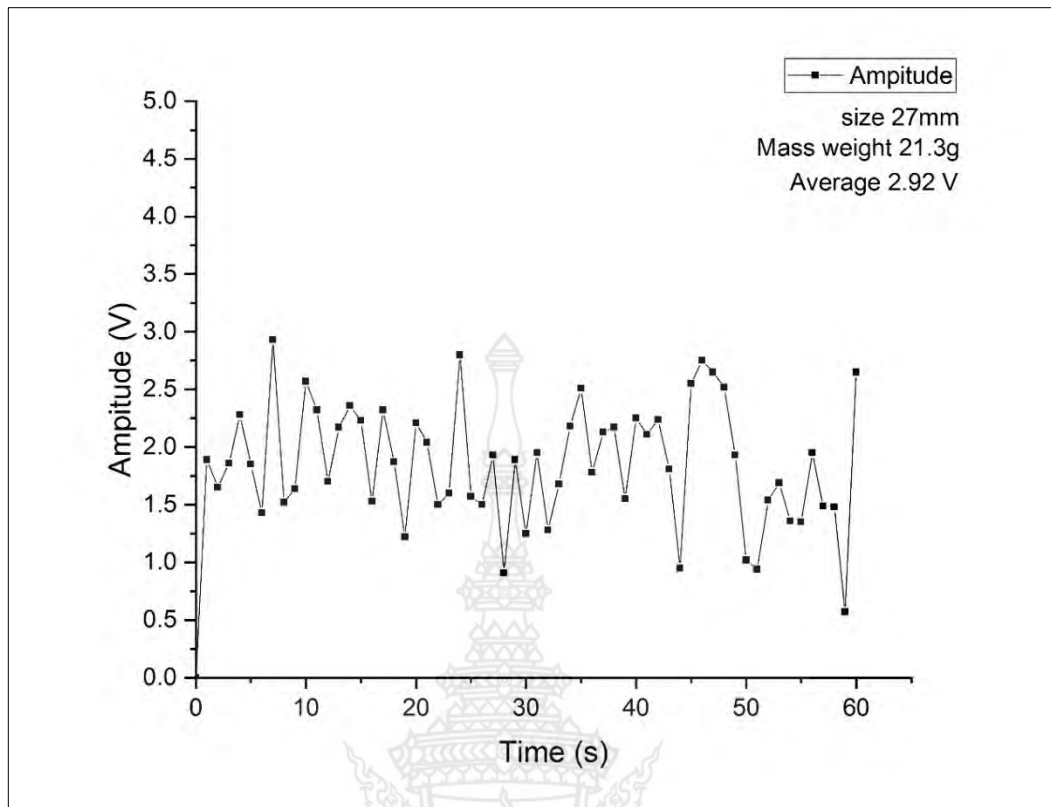


รูปภาพที่ 4.2 กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก 15.4g

หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

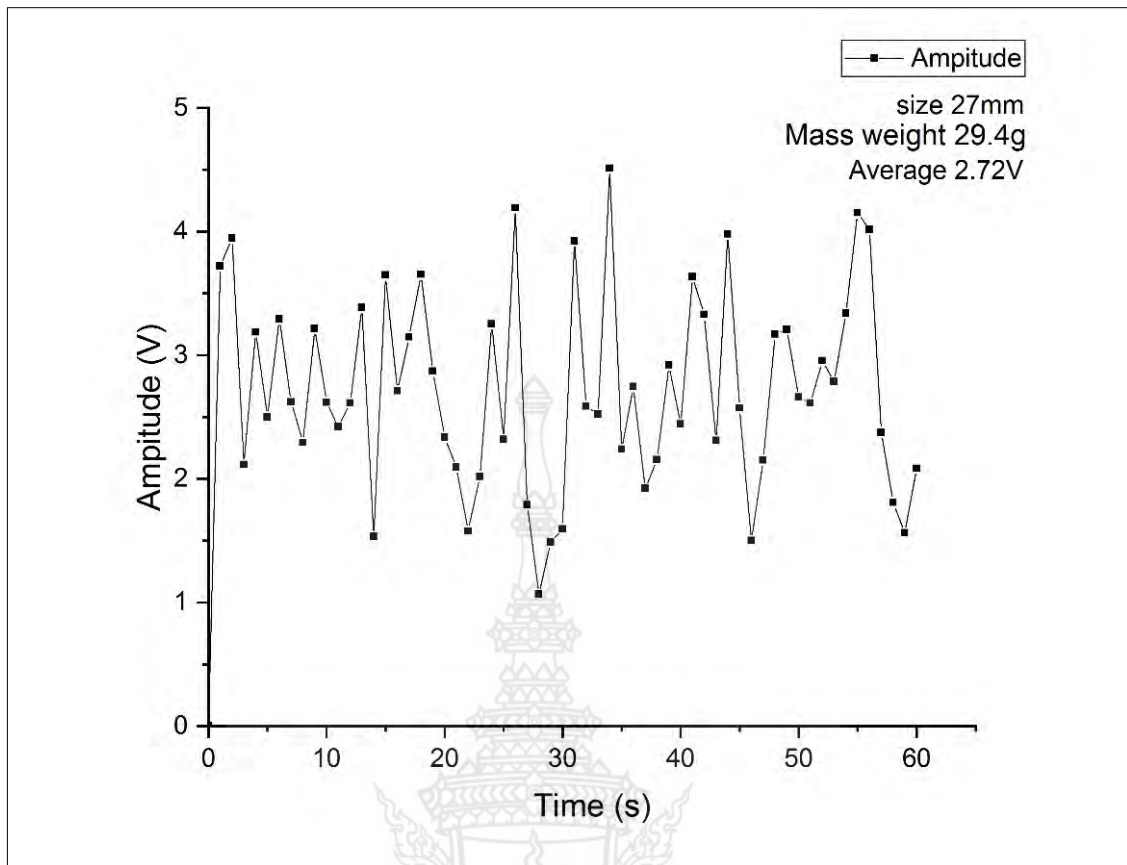
จากรูปภาพที่ 4.2 ที่ได้ทำการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตรมาติดตั้งโดยการจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในช่วงความถี่เดียวกันโดยใช้ตัวแปรน้ำหนัก Mass weight ที่ขนาด 15.4g ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับพลังงานจากการทดลองทั้งหมด5ครั้งภายในเวลาที่เท่ากันนั้นซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าในภายในเวลา 1วินาทีต่ำสุดอยู่ที่ขนาดของแรงดัน 0.50V และสูงสุดอยู่ที่ 2.43V และได้ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.45V ภายใต้ตัวแปรของน้ำหนักที่ 15.4g และเมื่อคำนวณระดับพลังงานที่จากสมการที่ (2.15) สามารถดูดซับได้ สูงสุดที่  $5.905 \times 10^{-8}$  จูล (J) และเฉลี่ยอยู่ที่  $2.103 \times 10^{-8}$  จูล(J)





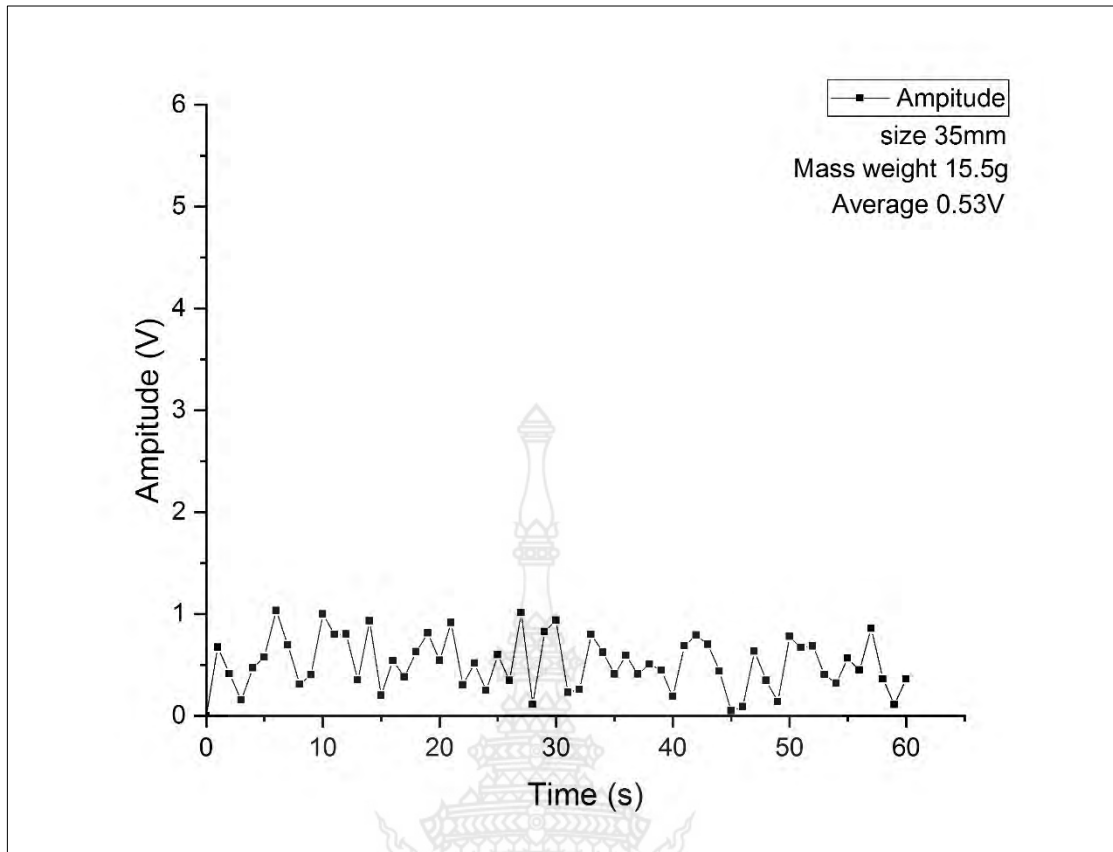
รูปภาพที่ 4.3 กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก 21.3g  
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปภาพที่ 4.3 ที่ได้ทำการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตรมาติดตั้งโดยการจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในช่วงความถี่เดียวกันโดยใช้ตัวแปร น้ำหนัก Mass weight ที่ขนาด 21.3g ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับพลังงาน จากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งภายในเวลาที่เท่ากันซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าในภายในเวลา 1 วินาทีต่ำสุด อยู่ที่ขนาดของแรงดัน 0.57V และสูงสุดอยู่ที่ 2.92V และได้ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.85V ภายใต้ตัวแปรของน้ำหนักที่ 21.3g และเมื่อคำนวณระดับพลังงานจากสมการที่ (2.15) ที่สามารถดูดซับได้สูงสุดที่  $8.527 \times 10^{-8}$  จูล (J) และเฉลี่ยอยู่ที่  $3.423 \times 10^{-8}$  จูล (J)



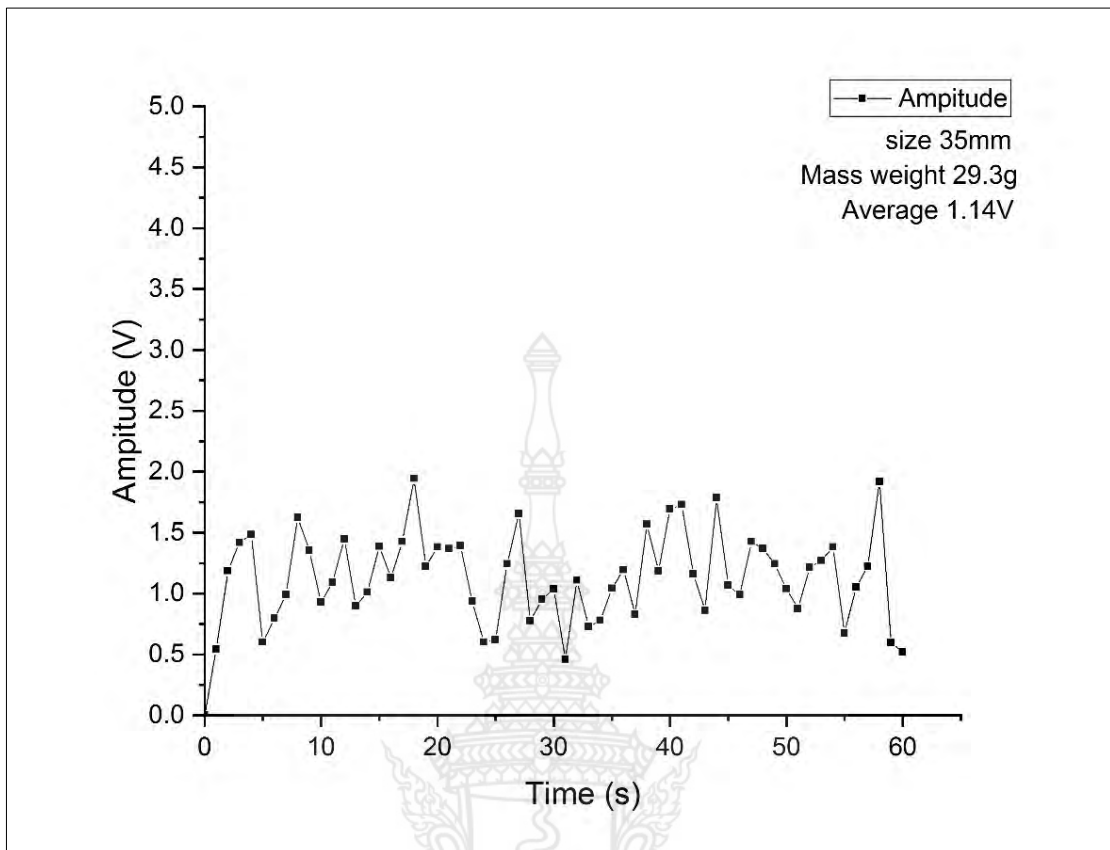
รูปภาพที่ 4.4 กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก 29.4g  
 หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปภาพที่ 4.4 ที่ได้ทำการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตรมาติดตั้งโดยการจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในช่วงความถี่เดียวกันโดยใช้ตัวแปรน้ำหนัก Mass weight ที่ขนาด 29.4g ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับพลังงานจากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งภายในเวลาที่เท่ากันนั้นสามารถดูดซับพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ขนาดพลังงาน 0.00V และสูงสุดอยู่ที่ 4.99V และค่าของขนาดเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 5 ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าในภายในเวลา 1 วินาทีต่ำสุดอยู่ที่ขนาดของแรงดัน 1.06V และสูงสุดอยู่ที่ 4.51V และได้ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 2.72V ภายใต้ตัวแปรของน้ำหนักที่ 29.4g และเมื่อคำนวณระดับพลังงานจากสมการที่ (2.15) ที่สามารถดูดซับพลังงานได้ สูงสุดที่  $20.34 \times 10^{-8}$  จูล (J) และเฉลี่ยอยู่ที่  $7.4 \times 10^{-8}$  จูล (J)



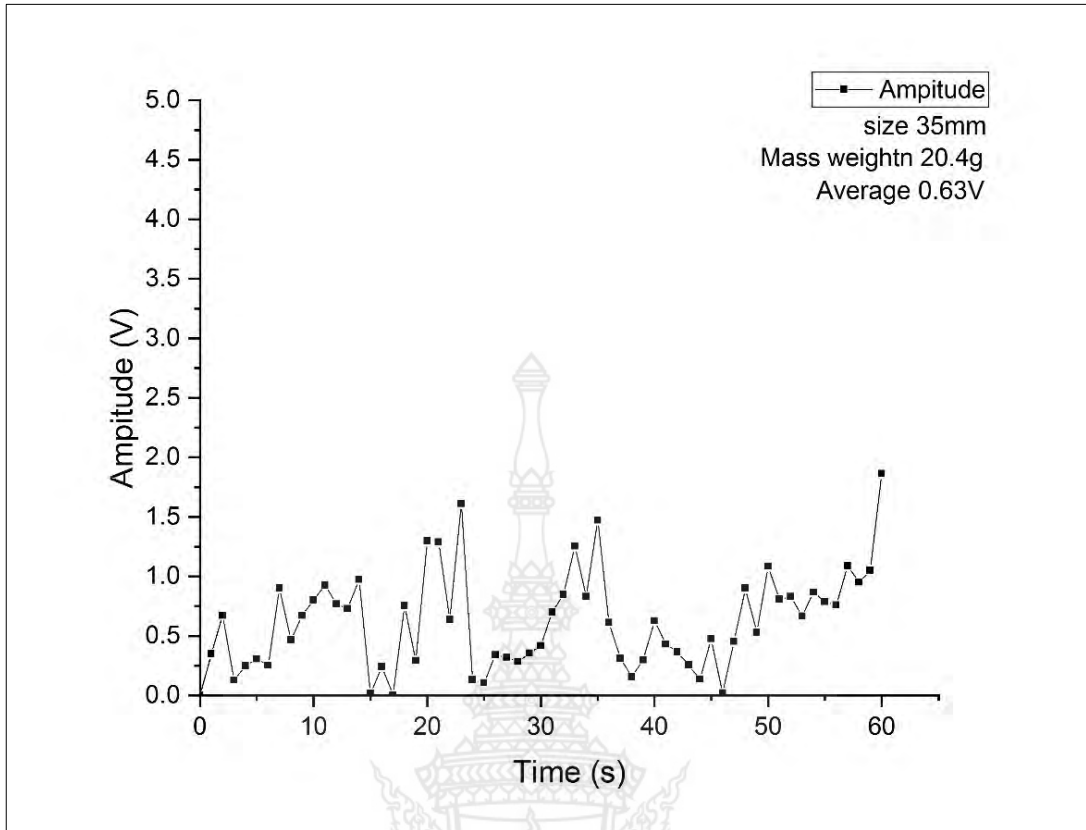
รูปภาพที่ 4.5 กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก 15.5g  
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปที่ 4.5 กราฟที่ได้ทำการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรมาติดตั้งโดยการจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในช่วงความถี่เดียวกันโดยใช้ตัวแปรน้ำหนัก Mass weight ที่ขนาด 15.5g ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับพลังงานจากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งภายในเวลาที่เท่ากันนั้นสามารถดูดซับพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ขนาดพลังงาน 0.01V และสูงสุดอยู่ที่ 3.58V และค่าของขนาดเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 5 สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าในภายในเวลา 1 วินาทีที่ต่ำสุดอยู่ที่ขนาดของแรงดัน 0.05V และสูงสุดอยู่ที่ 1.03V และได้ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.53V ภายใต้ตัวแปรของน้ำหนักที่ 15.5g และเมื่อคำนวณระดับพลังงานที่สามารถดูดซับได้ สูงสุดที่  $1.963 \times 10^{-8}$  จูล (J) และเฉลี่ยอยู่ที่  $1.039 \times 10^{-8}$  จูล (J)



รูปภาพที่ 4.6 กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก 29.3g  
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

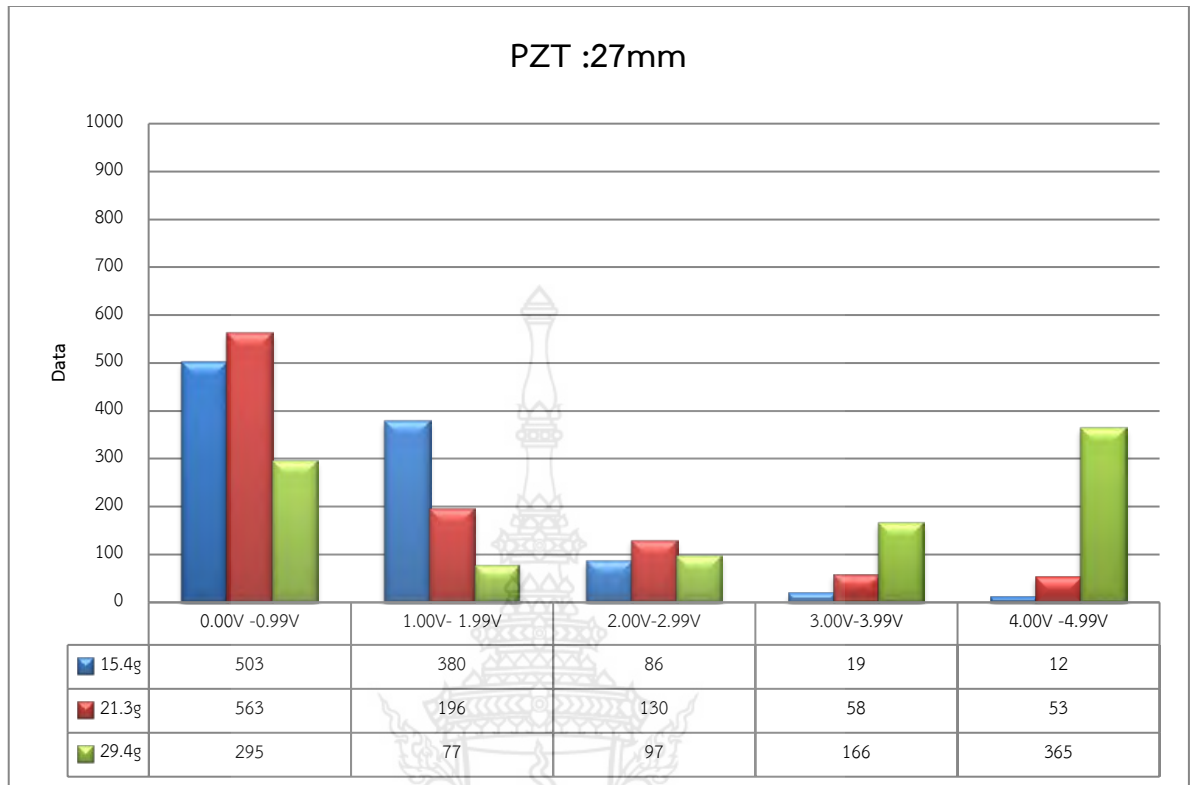
จากรูปภาพที่ 4.6 ได้ทำการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรมาติดตั้งโดยการจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในช่วงความถี่เดียวกันโดยใช้ตัวแปรน้ำหนัก Mass weight ที่ขนาด 29.3g ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับพลังงานจากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งภายในเวลาที่เท่ากันนั้นสามารถดูดซับพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ขนาดพลังงาน 0.01V และสูงสุดอยู่ที่ 3.58V และค่าของขนาดเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 5 สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าในภายในเวลา 1 วินาทีที่ต่ำสุดอยู่ที่ขนาดของแรงดัน 0.50V และสูงสุดอยู่ที่ 1.94V และได้ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.14V ภายใต้ตัวแปรของน้ำหนักที่ 29.3g และเมื่อคำนวณระดับพลังงานที่สามารถดูดซับได้ สูงสุดที่  $6.963 \times 10^{-8}$  จูล (J) และเฉลี่ยอยู่ที่  $2.405 \times 10^{-8}$  จูล (J)



รูปภาพที่ 4.7 กราฟแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก 20.4g  
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปภาพที่ 4.7 ได้ทำการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรมาติดตั้งโดยการจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในช่วงความถี่เดียวกันโดยใช้ตัวแปรน้ำหนัก Mass weight ที่ขนาด 20.4g ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับพลังงานจากการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งภายในเวลาที่เท่ากันนั้นสามารถดูดซับพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ขนาดพลังงาน 0.10V และสูงสุดอยู่ที่ 1.86V และค่าของขนาดเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 5 สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าในภายในเวลา 1 วินาทีที่ต่ำสุดอยู่ที่ขนาดของแรงดัน 0.50V และสูงสุดอยู่ที่ 1.94V และได้ค่าเฉลี่ยของขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.63V ภายใต้ตัวแปรของน้ำหนักที่ 20.4g และเมื่อคำนวณระดับพลังงานที่สามารถดูดซับได้ สูงสุดที่  $6.4 \times 10^{-8}$  จูล (J) และเฉลี่ยอยู่ที่  $0.735 \times 10^{-8}$  จูล (J)

### 4.3 การศึกษาลักษณะของข้อมูลของตัวแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



รูปภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าของสัญญาณข้อมูลจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตรที่ตัวแปร น้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g  
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปภาพที่ 4.8 เป็นการแสดงข้อมูลของขนาดข้อมูลในแต่ละช่วงการทดลองโดยมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงในส่วนของตัวแปรน้ำหนักที่ 15.5g 20.4g และ 29.3g ตามลำดับ โดยจะเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดเป็นจำนวนที่เท่ากันที่ 1000 ข้อมูลในเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ช่วงความถี่ที่ทดลองที่ขนาดเดียวกัน ซึ่งจากการทดลองการนำเซนเซอร์เพียโซอิเล็กทริกขนาด 27 มิลลิเมตรมาทดสอบการดูดซับพลังงานจากการจำลองการสั่นสะเทือนและทำการวิเคราะห์สัญญาณในแต่ละช่วงเวลาซึ่งได้ผลดังนี้เมื่อน้ำหนักขนาดที่น้อยที่สุดในการทดลองคือ 15.4g

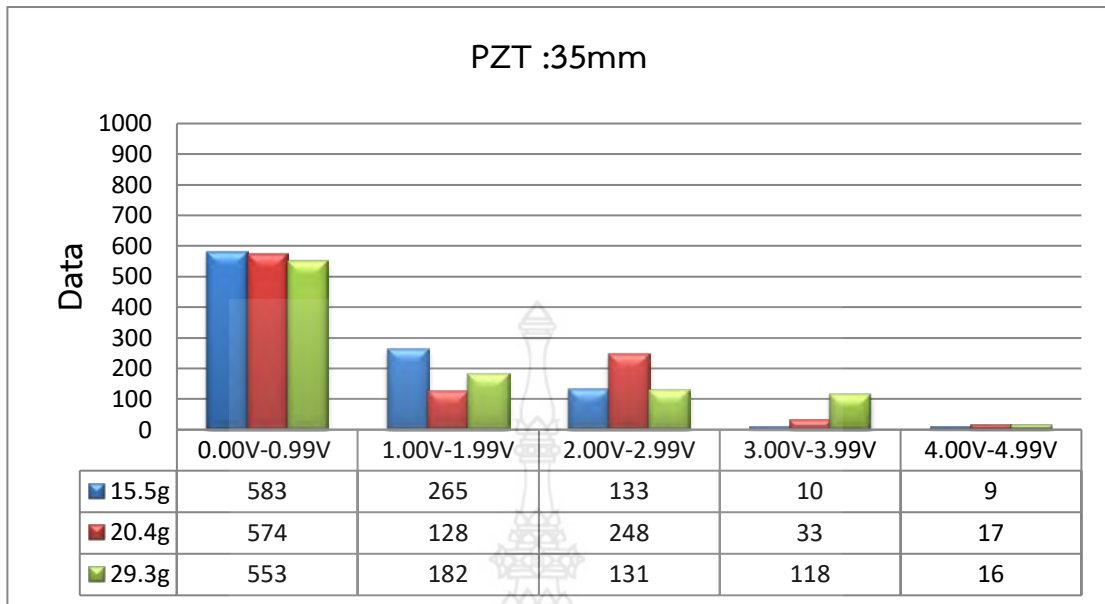
จากการสังเกตและวิเคราะห์ขนาดของสัญญาณซึ่งจะได้ขนาดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 0.00v-0.99v ที่จำนวนข้อมูล 503 ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.46V และที่ขนาดของสัญญาณในช่วง 1.00v-1.99V ที่จำนวน 380 ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5V และในช่วง 2.00V-2.99V ที่จำนวนข้อมูล 86 ข้อมูลโดย

เฉลี่ยอยู่ที่ 2.43V และในช่วง3.00V-3.99V ที่จำนวนข้อมูล 19ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.46 V และในช่วง 4.00V-4.99 ที่จำนวนข้อมูล 12โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.47V

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรที่ขนาดน้ำหนักที่ 21.3g จะได้ขนาดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 0.00v-0.99v ที่จำนวนข้อมูล 563ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.45V และที่ขนาดของสัญญาณในช่วง 1.00v-1.99V ที่จำนวน196ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.48V และในช่วง2.00V-2.99V ที่จำนวนข้อมูล 130ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.53V และในช่วง3.00V-3.99V ที่จำนวนข้อมูล 58ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.48V และในช่วง4.00V-4.99 ที่จำนวนข้อมูล 53โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.51V

เมื่อเปลี่ยนตัวแปรที่ขนาดน้ำหนักที่ 29.4gซึ่งเป็นตัวแปรสุดท้ายในการทดลองได้ขนาดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 0.00v-0.99v ที่จำนวนข้อมูล 295ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.46V และที่ขนาดของสัญญาณในช่วง 1.00v-1.99V ที่จำนวน 77ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.52V และในช่วง2.00V-2.99V ที่จำนวนข้อมูล97ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.50V และในช่วง3.00V-3.99V ที่จำนวนข้อมูล 166ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.53V และในช่วง4.00V-4.99 ที่จำนวนข้อมูล 365ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.68V

สรุปจากการทดลองการเปลี่ยนตัวแปรในส่วนของน้ำหนักที่นำมาเป็นตัวกระตุ้นสัญญาณจากการสั่น สะเทือนเพื่อทำการดูดัชนีพลังงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาด 27mm ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มขนาดของน้ำหนักขึ้นในแต่ละช่วงในแต่ละการ ทดลองจะทำให้ได้ขนาดของสัญญาณในบางช่วงเพิ่มมากยิ่งขึ้นแต่ในขณะเดียวกันในช่วงสัญญาณที่ต่ำที่สุดกลับแปรผกผันตามน้ำหนักเช่น ที่ขนาดน้ำหนัก15.4g ได้จำนวนของข้อมูลที่สูงที่สุดในคาบที่ 0.00V-0.99V ที่503 ข้อมูลแต่เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรน้ำไปเพิ่มไปที่ขนาด 29.4g ขนาดของข้อมูลในช่วง 0.00v-0.99vและ1.00V-1.99 2.00V-2.99V ได้มีการลดลงของจำนวนข้อมูลแต่มีการเพิ่มขึ้นในส่วนองข้อมูลในช่วงที่มีขนาดข้อมูลที่สูงกว่าคือช่วงที่ 3.00V-3.99V และ4.00V-4.99V ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละช่วงสูงสุดคือ 3.53V-4.68V



รูปภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าของสัญญาณข้อมูลจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตรที่ตัวแปร น้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g

หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปข้างบนเป็นการแสดงข้อมูลของขนาดข้อมูลในแต่ละช่วงการทดลองโดยมีตัวแปรที่เปลี่ยนไปในส่วนของตัวแปรน้ำหนักที่ 15.5g 20.4g และ 29.3g ตามลำดับ โดยจะเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดเป็นจำนวนที่เท่ากันที่ 1000ข้อมูลในเวลาที่เท่ากันโดยการใช้ช่วงความถี่ที่ทดลองที่ขนาดเดียวกัน ซึ่งจากการทดลองการนำเซนเซอร์เพียโซอิเล็กทริกขนาด 35 มิลลิเมตรมาทดสอบการดูดซับพลังงานจากการจำลองการสั่นสะเทือนและทำการวิเคราะห์สัญญาณในแต่ละช่วงเวลาซึ่งได้ผลดังนี้เมื่อที่น้ำหนักขนาดที่น้อยที่สุดในการทดลองคือ 15.5g จากการสังเกตและวิเคราะห์ขนาดของสัญญาณซึ่งจะได้ขนาดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 0.00v-0.99v ที่จำนวนข้อมูล 583ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.5V และที่ขนาดของสัญญาณในช่วง 1.00v-1.99V ที่จำนวนข้อมูล 265ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.35V และในช่วง 2.00V-2.99V ที่จำนวนข้อมูล 133ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.38V และในช่วง 3.00V-3.99V ที่จำนวนข้อมูล 10ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.6 V และในช่วง 4.00V-4.99 ที่จำนวนข้อมูล 9โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.4V

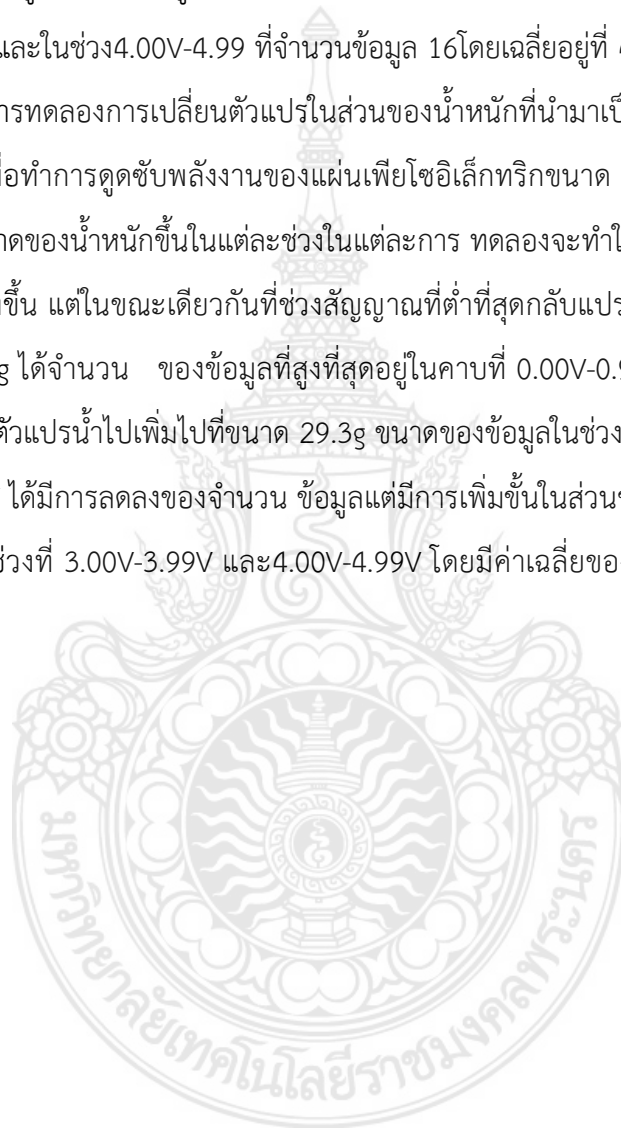
เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรที่ขนาดน้ำหนักที่ 20.4g จะได้ขนาดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 0.00v-0.99v ที่จำนวนข้อมูล 574ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.40V และที่ขนาดของสัญญาณในช่วง 1.00v-1.99V ที่จำนวนข้อมูล 128ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.38V และในช่วง 2.00V-2.99V ที่จำนวนข้อมูล 248ข้อมูล



โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.2V และในช่วง3.00V-3.99V ที่จำนวนข้อมูล33ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.32V และในช่วง4.00V-4.99 ที่จำนวนข้อมูล 17โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.05V

เมื่อเปลี่ยนตัวแปรที่ขนาดน้ำหนักที่29.3gซึ่งเป็นตัวแปรสุดท้ายในการทดลองได้ขนาดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 0.00v-0.99v ที่จำนวนข้อมูลที่ 553ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.5V และที่ขนาดของสัญญาณในช่วง 1.00v-1.99V ที่จำนวน182ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.47V และในช่วง2.00V-2.99V ที่จำนวนข้อมูล131ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.46V และในช่วง3.00V-3.99V ที่จำนวนข้อมูล118ข้อมูลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.47 V และในช่วง4.00V-4.99 ที่จำนวนข้อมูล 16โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.00V

สรุปจากการทดลองการเปลี่ยนตัวแปรในส่วนของน้ำหนักที่นำมาเป็นตัวกระตุ้นสัญญาณจากการสั่น สะเทือนเพื่อทำการดูดซับพลังงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาด 35mm ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่ม ขนาดของน้ำหนักขึ้นในแต่ละช่วงในแต่ละการ ทดลองจะทำให้ได้ขนาดของสัญญาณในบางช่วงเพิ่มมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันในช่วงสัญญาณที่ต่ำที่สุดกลับแปรผกผันตามน้ำหนักเช่น ที่ขนาดน้ำหนัก15.5g ได้จำนวน ของข้อมูลที่สูงที่สุดในคาบที่ 0.00V-0.99V ที่583 ข้อมูลแต่เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรน้ำไปเพิ่มไปที่ขนาด 29.3g ขนาดของข้อมูลในช่วง 0.00v-0.99vและ1.00V-1.99 2.00V-2.99V ได้มีการลดลงของจำนวน ข้อมูลแต่มีการเพิ่มขึ้นในส่วนองข้อมูลในช่วงที่มีขนาดข้อมูลที่สูงกว่าคือช่วงที่ 3.00V-3.99V และ4.00V-4.99V โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดข้อมูลอยู่ที่3.47V-4.00V



#### 4.4 การศึกษาค่า Dielectric displacement ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจากตัวแปรภายนอก

ค่า Dielectric displacement

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.16)$$

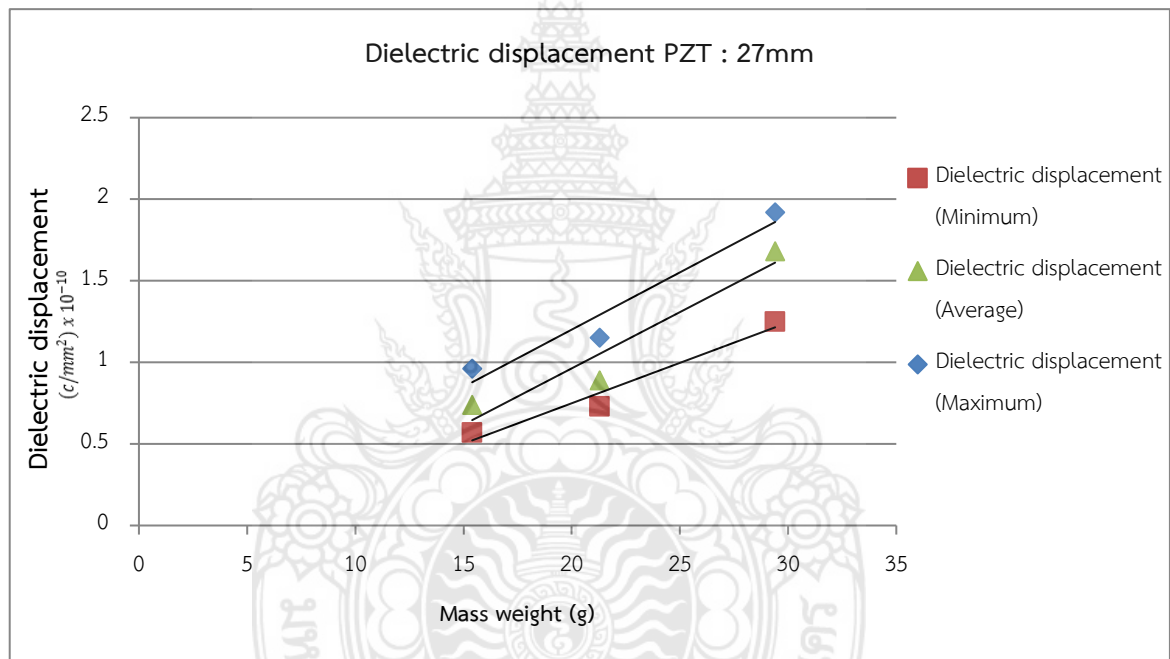
เมื่อ  $Q$  = ประจุไฟฟ้าที่สะสม

$A$  = พื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ )

$T$  = stress ( $N/m^2$ )

$d$  = piezoelectric strain constants ( $C/N$ )

$D$  = dielectric displacement ( $C/m^2$ )



รูปภาพที่ 4.10 กราฟแสดงค่า Dielectric displacement จากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตรที่ตัวแปรน้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g

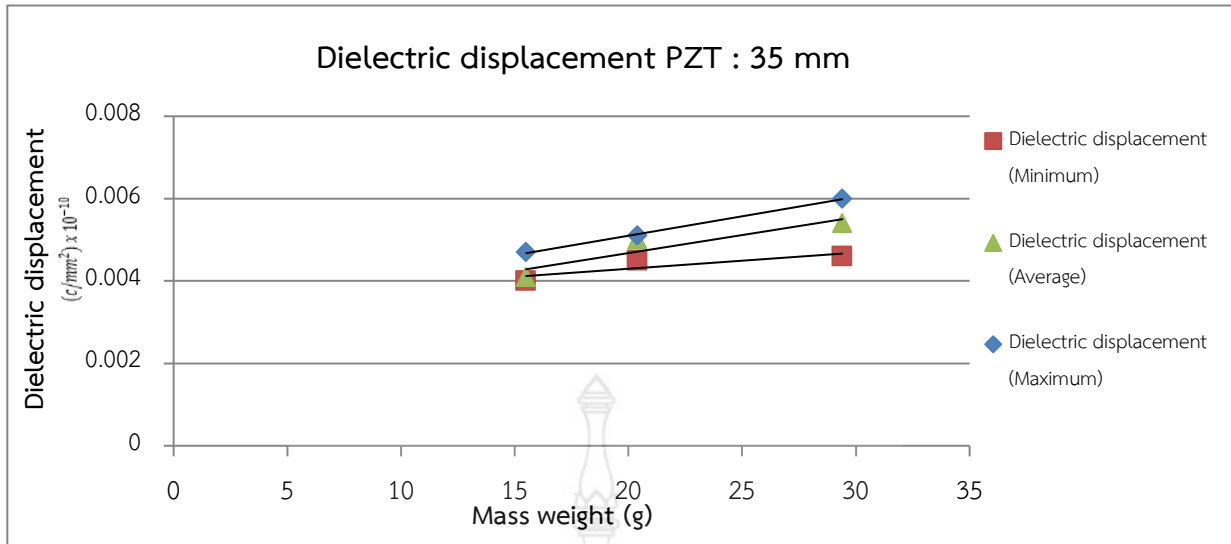
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

รูปภาพที่ 4.10 กราฟนี้ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก (Mass weight) กับค่า Dielectric displacement ที่ตัวแปรของน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปที่ขนาด 15.4g 21.3g และ 29.3g ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลจะใช้ตัวแปรเวลาที่เท่ากันและการใช้ช่วงความถี่ที่ทดลองที่ขนาดเดียวกันและทำการแยกขนาดของพลังงานหรือระดับพลังงานต่าง ๆ

ที่เก็บเกี่ยวได้นั้น มาทำการคำนวณหาค่า Dielectric displacement โดยจะทำการแยกที่ขนาดค่า Dielectric displacementต่ำสุด(Minimum) ค่า Dielectric displacement ค่าเฉลี่ย(Average) และค่า Dielectric displacement สูงสุดที่ได้จากการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่27มิลลิเมตรโดยใช้ตัวแปรน้ำหนักที่ 15.4g นั้นได้ค่า Dielectric displacement ในช่วงค่าต่ำสุดไปยังค่าที่มากที่สุดเท่ากับ  $0.57 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$   $0.74 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$  และ  $0.96 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$  ตามลำดับ และเมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรของน้ำหนักที่ขนาด21.3g นั้นได้ Dielectric displacement ในช่วงค่าต่ำสุดไปยังค่าที่มากที่สุดเท่ากับ  $0.73 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$   $0.89 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$  และ  $1.15 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$  ตามลำดับและเมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรที่ขนาดสูงสุดที่ 29.3g นั้นได้ค่า Dielectric displacement ในช่วงค่าต่ำสุดไปยังค่าที่มากที่สุดเท่ากับ  $1.25 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$   $1.68 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$  และ  $1.92 \times 10^{-10} \text{ C/mm}^2$  ตามลำดับ





รูปภาพที่ 4.11 กราฟแสดงค่า Dielectric displacement จากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตรที่น้ำหนัก (1) 15.4g (2) 21.3g (3) 29.4g  
หมายเหตุ : วงจรที่ใช้ในการทดลอง ใช้รับแรงดันไฟสูงสุดไม่เกิน 5V

จากรูปภาพที่ 4.11 นั้นได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก (Mass weight) กับค่า Dielectric displacement ที่ตัวแปรของน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปที่ขนาด 15.5g 20.4g และ 29.4g ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลจะใช้ตัวแปรเวลาที่เท่ากันและการใช้ช่วงความถี่ที่ทดลองที่ขนาดเดียวกันและทำการแยกขนาดของพลังงานหรือระดับพลังงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้นั้น มาทำการคำนวณหาค่า Dielectric displacement โดยจะทำการแยกที่ขนาดค่า Dielectric displacement ต่ำสุด (Minimum) ค่า Dielectric displacement ค่าเฉลี่ย (Average) และค่า Dielectric displacement สูงสุดที่ได้จากการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองนำแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 35 มิลลิเมตรโดยใช้ตัวแปรน้ำหนักที่ 15.4g นั้นได้ค่า Dielectric displacement ในช่วงค่าต่ำสุดไปยังค่าที่มากที่สุดเท่ากับ  $0.0040 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup>  $0.0041 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup> และ  $0.0047 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ และเมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรของน้ำหนักที่ขนาด 20.4g นั้นได้ Dielectric displacement ในช่วงค่าต่ำสุดไปยังค่าที่มากที่สุดเท่ากับ  $0.0045 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup>  $0.0050 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup> และ  $0.0051 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup> ตามลำดับและเมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรที่ขนาดสูงสุดที่ 29.3g นั้นได้ค่า Dielectric displacement ในช่วงค่าต่ำสุดไปยังค่าที่มากที่สุดเท่ากับ  $0.0045 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup>  $0.0054 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup> และ  $0.0060 \times 10^{-10}$  c/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ

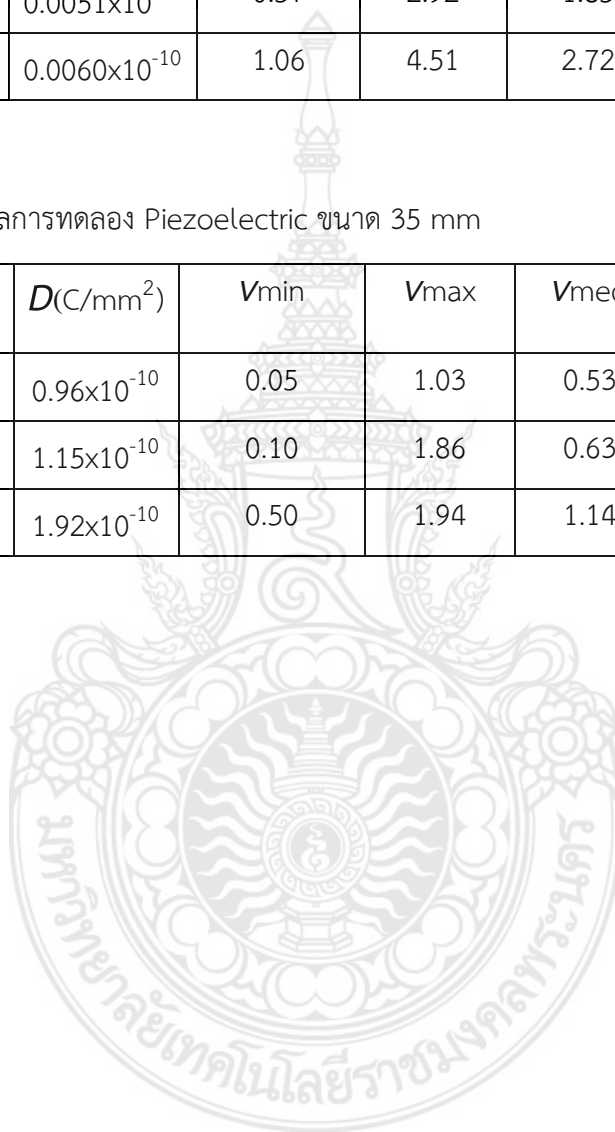
#### 4.5 ตารางสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลอง Piezoelectric ขนาด 27 mm

Mass weight(g)	$D(C/mm^2)$	$V_{min}$	$V_{max}$	$V_{med}$	$P_{med}$
15.4	$0.0047 \times 10^{-10}$	0.50	1.94	1.14	$2.103 \times 10^{-8}$
21.3	$0.0051 \times 10^{-10}$	0.57	2.92	1.85	$3.423 \times 10^{-8}$
29.4	$0.0060 \times 10^{-10}$	1.06	4.51	2.72	$7.4 \times 10^{-8}$

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลอง Piezoelectric ขนาด 35 mm

Mass weight (g)	$D(C/mm^2)$	$V_{min}$	$V_{max}$	$V_{med}$	$P_{med}$
15.5	$0.96 \times 10^{-10}$	0.05	1.03	0.53	$0.520 \times 10^{-8}$
20.4	$1.15 \times 10^{-10}$	0.10	1.86	0.63	$0.735 \times 10^{-8}$
29.3	$1.92 \times 10^{-10}$	0.50	1.94	1.14	$2.405 \times 10^{-8}$



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุผลึกที่เรียกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PZT ที่มีสมบัติและความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือแรงทางกลที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเกิดจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างภายในของวัสดุและยังศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการดูดซับพลังงานจลน์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนโดยการออกแบบอุปกรณ์ในการตรวจจับสัญญาณจากการสั่นสะเทือนในการตรวจจับสัญญาณไฟฟ้านั้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่เกิดการสั่นสะเทือนระหว่างการทำงานและสามารถนำไปต่อยอดในการออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานได้ในอนาคตข้างหน้าเนื่องด้วยวัสดุในยุคสมัยปัจจุบันนั้นมีขนาดที่เล็กลงถึงระดับนาโนผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กๆได้ เพราะไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานมากซึ่งการทดลองการเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีผลการทดลองดังนี้

1. การศึกษาตัวแปรในส่วนของคุณลักษณะผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นสะเทือนนั้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 27 มิลลิเมตรนั้นสามารถได้รับสัญญาณทางไฟฟ้าได้ดีกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 35 มิลลิเมตรเพราะแรงดันไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับ compress stress ซึ่ง stress นั้นแปรผันตรงกับแรงและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานหรือแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ( $\text{stress} = \text{force} / \text{area}$ ) ดังนั้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 27 มิลลิเมตรนั้นจึงเกิด stress มากกว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดใหญ่ที่ขนาด 35 มิลลิเมตร

2. ตุ่มน้ำหนกที่ใช้เป็นตัวแปรในการกระตุ้นสัญญาณทางไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับสัญญาณไฟฟ้าที่แผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกผลิตได้จะทำให้มีขนาดของสัญญาณที่ใหญ่และชัดเจนขึ้นเมื่อใช้ตุ่มน้ำหนกที่มีขนาดมากขึ้นแต่การใช้ตุ่มน้ำหนกที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้แรงกลที่เกิดสูงขึ้นส่งผลให้แผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการเสื่อมสภาพหรือเสียหายได้อาจจะส่งผลต่อสัญญาณที่ผิดปกติไปจากเดิม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาพบว่าสัญญาณทางไฟฟ้านั้นแปรผันตรงกับ compressive stress ดังนั้นหากมีกลไกหรือการเลือกใช้วัสดุที่นำมาทำเป็นหัวตรวจจับสัญญาณหรือตุ่มนำหนักที่มากระตุ้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการถ่ายโอนแรงที่ดีขึ้นนั้นทำให้มีความเที่ยงตรงของสัญญาณมากขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เช่น การใช้กลไกของสปริงในการดูดซับแรงที่ส่งมายังแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

2. การเลือกใช้ Data acquisition ที่สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลได้ดีกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กและยังสามารถเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่ถูกต้องได้และจะทำให้สามารถเก็บและตรวจสอบข้อมูลได้ในจำนวนที่มากขึ้นที่มากขนาด 10bit ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ชัดเจนมากขึ้น

3. การประยุกต์ใช้วงจรไฟฟ้าที่สามารถควบคุมระดับพลังงานให้เหมาะสมกับตัวบอร์ดควบคุม เช่น วงจร Zero span และ วงจร instrument amplifier ในการขยายลักษณะของสัญญาณ



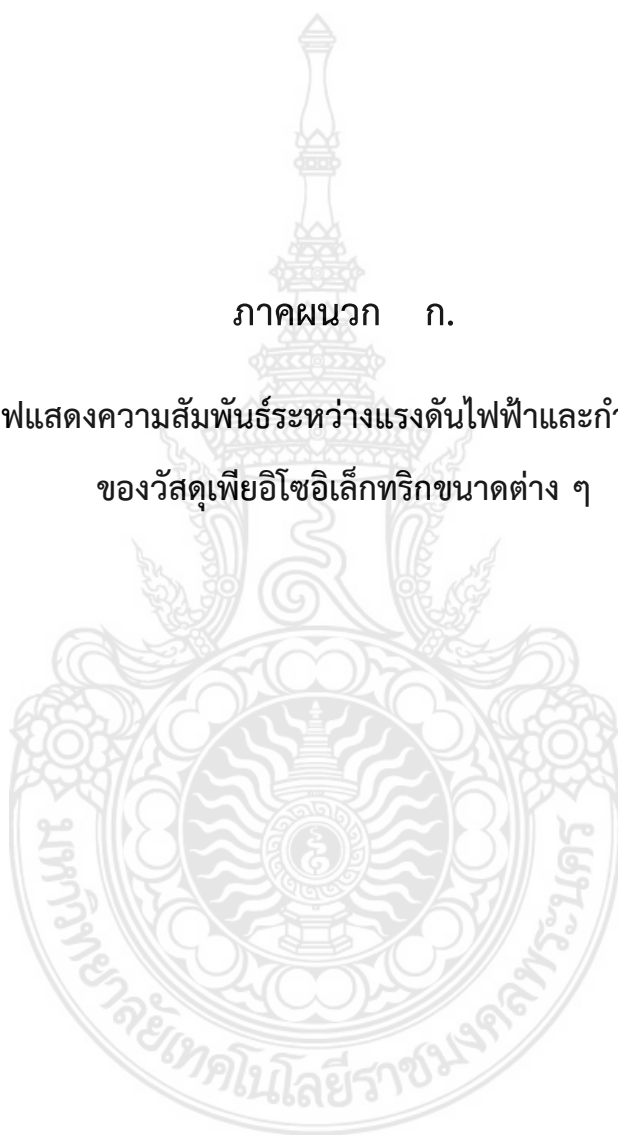
## รายการอ้างอิง

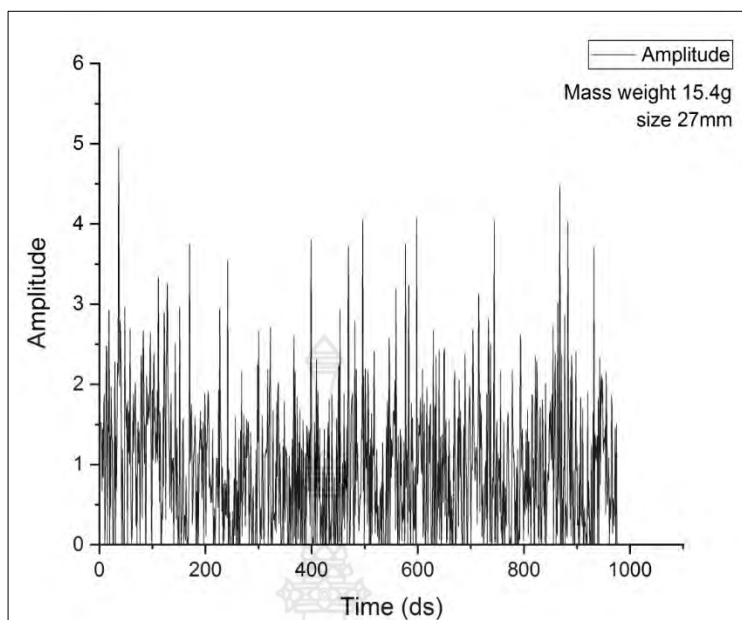
- [1] รัตติกร ยี่มนิรัฐ และ สุพล อนันตา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2545
- [2] ธงชัย โชติวัฒนกานต์กุล และ ชัชชัย คุณบัว (2013)
- [3] นิตยา ใจทอง สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2014)
- [4] เบญญา เขิดหิรัญกร และเจียรนัย เล็กอุทัย ปีที่4 ฉบับที่25 (2016)
- [5] H. DebédaC. Lucat, V. Pommier-Budinger (2016)
- [6] Gianluca Acciari (2018)
- [7] Lu Wang, Jianjun Ding, Zhuangde Jiang, Guoxi Luo, Libo Zhao,Dejiang, Xiao Yangb, Maeda Ryutaro (2019, 17 January)
- [8] Prasertsiri Varunchittapongsa (2011)
- [9] Anuwat Mankiw, (มปป.)
- [10] นายนิธิพน พุทธงชัย สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2552
- [11] รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, การวัดเชิงกลด้วย LabVIEW, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



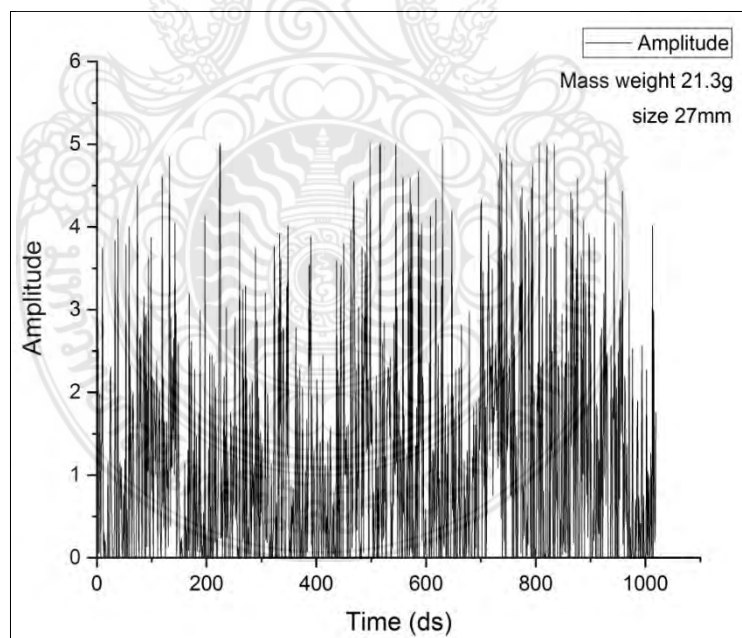
ภาคผนวก ก.

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า  
ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดต่าง ๆ

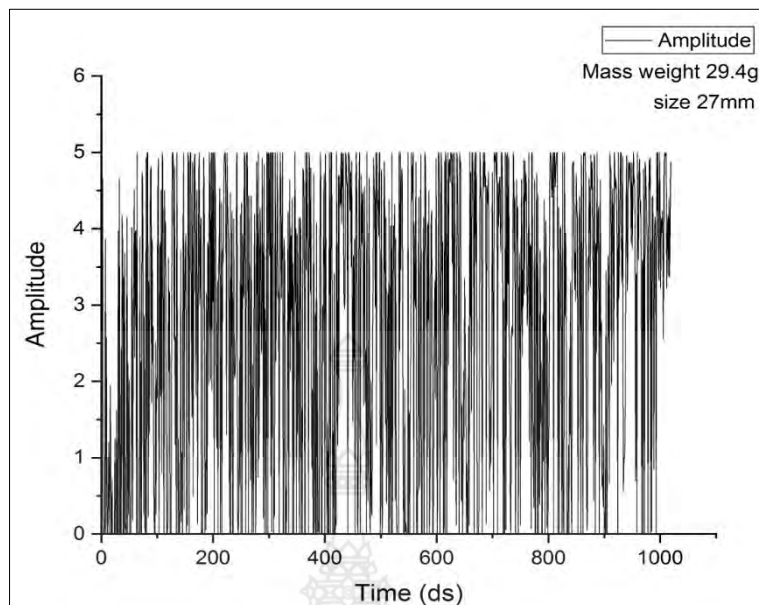




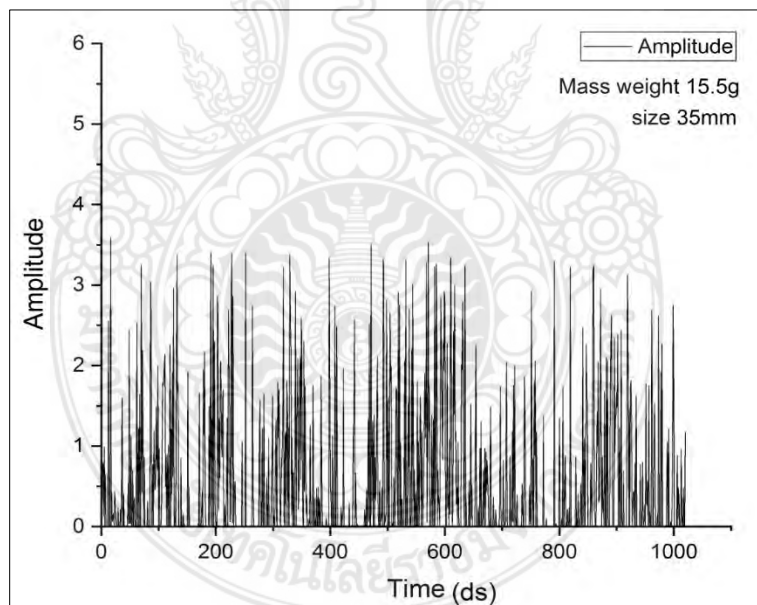
รูปที่ ก.1 กราฟข้อมูลดิบจากการแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร  
ที่ตัวแปรน้ำหนัก 15.4g



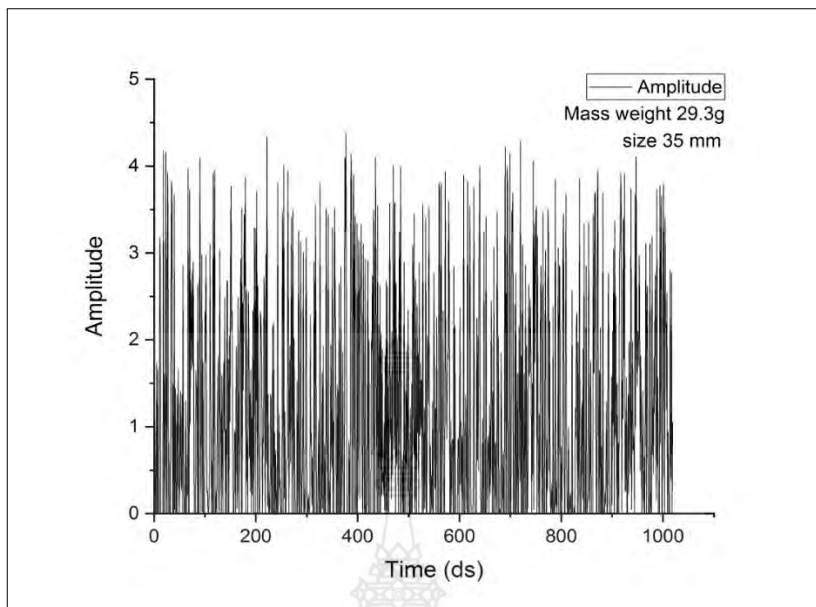
รูปที่ ก.2 กราฟข้อมูลดิบจากการแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร  
ที่ตัวแปรน้ำหนัก 21.3g



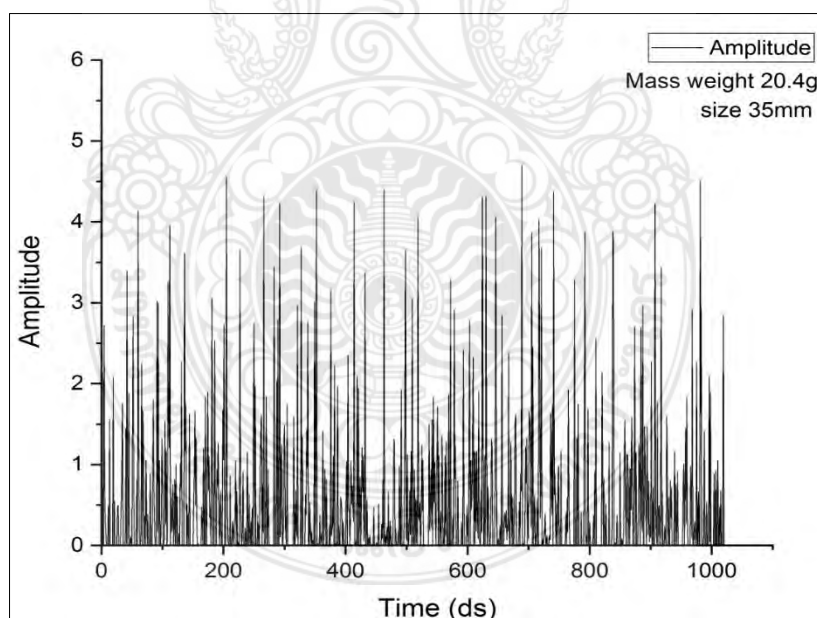
รูปที่ ก.3 กราฟข้อมูลดิบจากการแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 27 มิลลิเมตร  
ที่ตัวแปรน้ำหนัก 29.4g



รูปที่ ก.4 กราฟข้อมูลดิบจากการแสดงสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร  
ที่ตัวแปรน้ำหนัก 15.5g



รูปที่ ก.5 กราฟข้อมูลดิบจากการแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร  
ที่ตัวแปรน้ำหนัก 29.3g

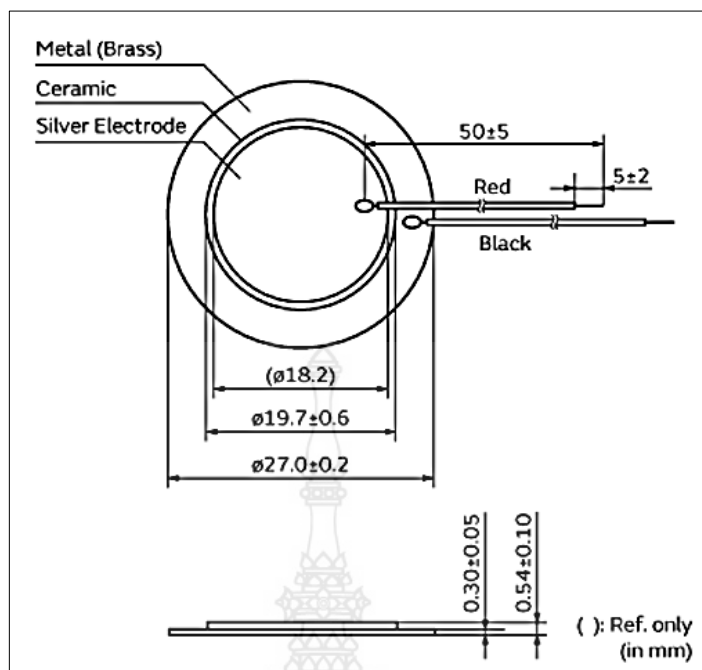


รูปที่ ก.6 กราฟข้อมูลดิบจากการแสดงลักษณะสัญญาณจากแผ่น PZT ขนาด 35 มิลลิเมตร  
ที่ตัวแปรน้ำหนัก 20.4g

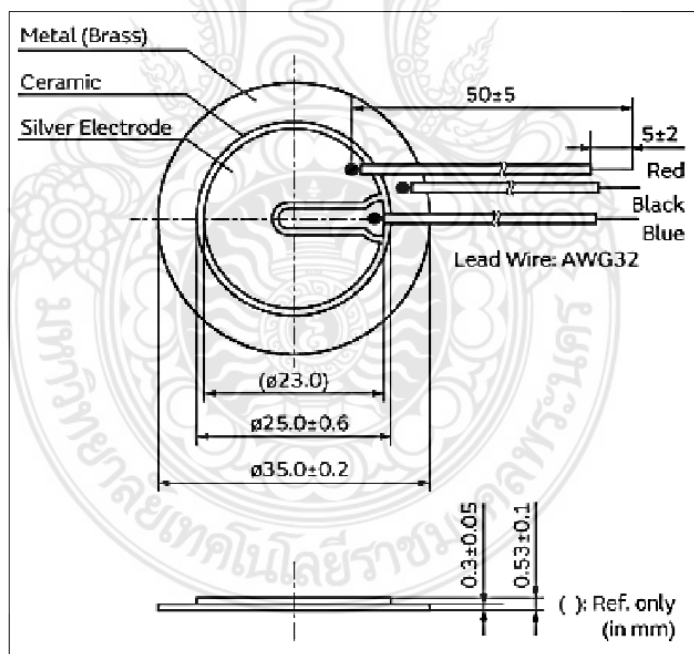
ภาคผนวก ข.

Product Search Data Sheet





รูปที่ ข.1 Product Search Data Sheet size 27 mm



รูปที่ ข.2 Product Search Data Sheet size 35 mm

## ประวัติการศึกษา

ชื่อ นามสกุล ธีญธร เพชรทวิรัตน์  
 วัน เดือน ปีเกิด 10 มีนาคม 2540  
 ภูมิลำเนา 111/3 หมู่ 6 ตำบลสัตหีบ อําสัตหีบ จังหวัดชลบุรี 20180

## ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
มัธยมศึกษา	สัตหีบวิทยาคม	2558
ประถมศึกษา	สัตหีบ	2552
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	Prame_thander@hotmail.com	

ชื่อ นามสกุล จุฑามาส กลีบพืง  
 วัน เดือน ปีเกิด 4 พฤศจิกายน 2540  
 ภูมิลำเนา 4/3 หมู่ 3 ตำบลบางขนุน อําเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

## ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
มัธยมศึกษา	บดินเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) นนทบุรี	2558
ประถมศึกษา	วัดสัก (จันทรศิริจำเรียมประชาสรร)	2552
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	Ms.jutamas.89@Gmail.com	