

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานผลการวิจัย
(ฉบับสมบูรณ์)



เรื่อง

การสร้างเครื่องมือวัดทดสอบลักษณะสมบัติอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

Ultrasonic Transducer Test Set

RCH
TK
๑๗๘๒

ผู้วิจัย

ภา๑๗๘๒ นางสาวภัทริยา กิตติเดชาชาญ

และคณะ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **117413**
วัน,เดือน,ปี...=4...ค.ศ. 2554

b. 112153๑๒
i.....

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการสร้างเครื่องมือวัดทดสอบลักษณะสมบัติอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุ โดยลูปฮิสเทอรีซิสนี้จะสร้างจากวงจร Sawyer-Tower ในวงจรจะป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ให้กับสารตัวอย่าง ซึ่งก็คืออัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ เพื่อให้เกิดการโพลาไรเซชันภายในวัสดุ สำหรับลูปฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จะถูกแสดงผลบนจอของออสซิลโลสโคปในโหมด x-y ซึ่งฮิสเทอรีซิสลูปที่วัดได้นี้จะใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ยกตัวอย่างเช่นค่าสนามไฟฟ้าโคเออซีฟ ค่าโพลาไรเซชันตกค้าง และค่าเพอมีทิวิตีสัมพัทธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

Measuring a hysteresis loop of ferroelectric materials is used in the ultrasonic transducer test set. The hysteresis loop of the material can be obtained from a loop tracer using the Sawyer and Tower circuit. In the circuit, the 50 Hz of an alternating electric field is applied to a sample, ultrasonic transducer, to obtain a corresponding polarization inside the sample. The output, the hysteresis loop of the ultrasonic transducer, is illustrated on a cathode ray tube (CRT) oscilloscope in x-y mode. The gained hysteresis loop is used to determine ultrasonic transducer properties; for example coercive electric field, remanent polarization and relative permittivity.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก	4
2.2 คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	10
2.3 ชนิด รูปแบบและการนำสารเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งาน	24
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานและวงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis	29
3. การวิจัยและการดำเนินงาน	34
3.1 วงจร Sawyer และ Tower แบบพื้นฐาน	34
3.2 วงจร Sawyer-Tower ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น	37
4. ผลการวิจัย	46
4.1 วิธีการทดลอง	47
4.2 ผลการวิจัย	48
5. สรุปผลการศึกษารายละเอียดและข้อเสนอแนะ	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.	83
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ กับการวัดซ้ำสำหรับวัสดุแต่ละชนิด	84
ภาคผนวก ข.	132
ภาพวงจรสำหรับการทดลองและการแสดงผล	133
บรรณานุกรม	137



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก	5
2.2 ปรากฎการณ Poling	6
2.3 การเปลี่ยนแปลงทางกลของสารเพียโซอิเล็กทริกขณะป้อนแรงดัน	7
2.4 การเปลี่ยนแปลงของสารเพียโซอิเล็กทริกจากการป้อนแรง	8
2.5 การเรียงตัวของไดโพล	9
2.6 ลักษณะของฮิสเทอรีซิสลูปและลักษณะความเครียดกับสนามไฟฟ้า	9
2.7 วงจรสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริก	14
2.8 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีแรงดันคงที่	15
2.9 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีกระแสคงที่	15
2.10 Hysteresis Loop ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	22
2.11 ลักษณะอุณหภูมิของสารต่างๆกับการ Aging	23
2.12 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Uimorph	26
2.13 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Bimorph	27
2.14 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Stack	27
2.15 ทรานสดิวเซอร์ที่มีลักษณะแบบ Sandwich	28
2.16 ลักษณะของแรงกดดัน (V) กับเวลา(t)	29
2.17 วงจร Sawyer-Tower	30
3.1 วงจร Sawyer-Tower แบบพื้นฐาน	34
3.2 minor loop	37
3.3 วงจร Sawyer และ Tower ที่ถูกปรับปรุงขึ้นใหม่	38
3.4 วงจรแบ่งแรงดัน	38
3.5 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณหาค่าความต้านทาน จำกัดกระแสและอัตราทนกำลัง	40
3.6 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณหาค่าความต้านทาน จำกัดกระแสอย่างละเอียด	42
3.7 Variac	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การต่อ Variac กับ Step-up transformer	44
3.9 วงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้	45
4.1 ลักษณะสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดแบบเรียบทีตาเนต	46
4.2 ลักษณะอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์	46
4.3 วงจรที่ใช้สำหรับการทดลอง	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 โหมตการสันและค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริก

11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในวงการอุตสาหกรรม ได้นำเอาเทคโนโลยีอุลตราโซนิคมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ทางการแพทย์ได้แก่ เครื่องตรวจสอบทารกในครรภ์ เครื่องทำลายนิ่ว ทางด้านอุตสาหกรรม เครื่องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยการสั่นด้วยคลื่นอุลตราโซนิค เครื่องผสมของเหลวด้วยเทคนิคการตีกวนด้วยอุลตราโซนิค เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่ นำเอาวัสดุชนิดสารเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่การที่จะทราบได้ว่าจะต้องนำเอาสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดใดไปประยุกต์ใช้งานได้เหมาะสมนั้น จำเป็นจะต้องใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชนิดสารเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเครื่องทดสอบลักษณะสมบัติ P-E ฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นชุดทดสอบที่สำคัญชุดหนึ่ง ที่นำมาใช้สำหรับคัดเลือกความเหมาะสมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้

โครงการวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างเครื่องมือวัดทดสอบลักษณะสมบัติ P-E ฮิสเทอรีซิสซึ่งจะสามารถวัดสารตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกชนิดใดๆ และมีรูปทรงต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น แวนผลึกของแข็งรูป โคนัท แผ่นบาง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริกและรายละเอียดของส่วนประกอบ P-E Hysteresis Loop Tracer และกระบวนการในการวัดลูป
- 1.2.2 สร้างวงจร Sawyer-Tower เพื่อทำหน้าที่วัดฮิสเทอรีซิสลูปของสาร
- 1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดต่างๆ จากฮิสเทอรีซิสลูปที่วัดได้ และจากคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกที่วัดได้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการทำโครงการ

หลักการของการสร้างเครื่องมือนี้จะใช้วงจรพื้นฐาน Sawyer และ Tower ในการวัดหา P-E ฮิสเทอรีซิสของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยจะทำการป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ในรูปของสัญญาณแรงดันสูงที่มีค่าแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงกับเวลา เข้าไปในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก แล้วทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์กับค่าสนามไฟฟ้า ในรูปของประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น ซึ่งค่าประจุนี้จะสัมพันธ์กับโพลาไรเซชัน และจะนำการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันไปพลอตกับสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดัน โดยจะแสดงผล P-E ฮิสเทอรีซิสบนจอของเครื่องออสซิลโลสโคป

1.4 วิธีการดำเนินงาน

เครื่องมือวัดทดสอบลักษณะสมบัติอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ 9 ขั้นตอน ได้แก่

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลในทางทฤษฎีเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริกและอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์
- 1.4.2 ศึกษาถึงหลักการและวิธีการที่จะวัด Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก รวมทั้งศึกษาการทำงานของเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการวัด
- 1.4.3 วาดเป็น Block diagram พร้อมทั้งแสดงถึงหลักการทำงานของเครื่องมือ
- 1.4.4 ออกแบบวงจรที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณแรงดัน โดยพิจารณาที่ละส่วน
- 1.4.5 ทำการต่อและทดสอบวงจรที่ละส่วน(ถ้าวงจรไม่ทำงานตามที่ต้องการให้ทำการออกแบบวงจรส่วนนั้นๆใหม่)
- 1.4.6 นำแต่ละส่วนของวงจรมาต่อรวมกันตาม Block Diagram
- 1.4.7 ทำการวัด P-E Hysteresis Loop ของสารเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิด โดยทำการแสดงผลที่จอออสซิลโลสโคป
- 1.4.8 วิเคราะห์ผลจากการคำนวณค่าต่างๆจาก Hysteresis Loop ที่ได้
- 1.4.9 สรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นและส่วนที่ต้องปรับปรุงแก้ไขต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16013

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 สามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ช่วยในการทดสอบเพื่อที่วัด Hysteresis Loop ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกแต่ละตัว เพื่อที่จะนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม
- 1.5.2 ช่วยในการค้นคว้าและวิจัย ในการที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการโพลาไรเซชันภายในวัสดุได้เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัสดุ โดยภายในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก โมเลกุลจะจัดเรียงตัวทำให้เกิดเป็นไดโพลไฟฟ้าขึ้น ซึ่งภายในสภาวะปกติแล้วนั้น ไดโพลจะมีทิศทางไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ทิศทางของไดโพลหักล้างกันทำให้ไม่เกิดการโพลาไรซ์ภายในวัสดุขึ้น แต่เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัสดุทิศทางของไดโพลจะจัดเรียงตัวกันตามสนามไฟฟ้าที่ได้รับทำให้เกิดการโพลาไรซ์ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ของโพลาไรเซชัน (P) กับสนามไฟฟ้า (E) แสดงดังสมการ

$$P = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E \quad (2.1)$$

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (2.2)$$

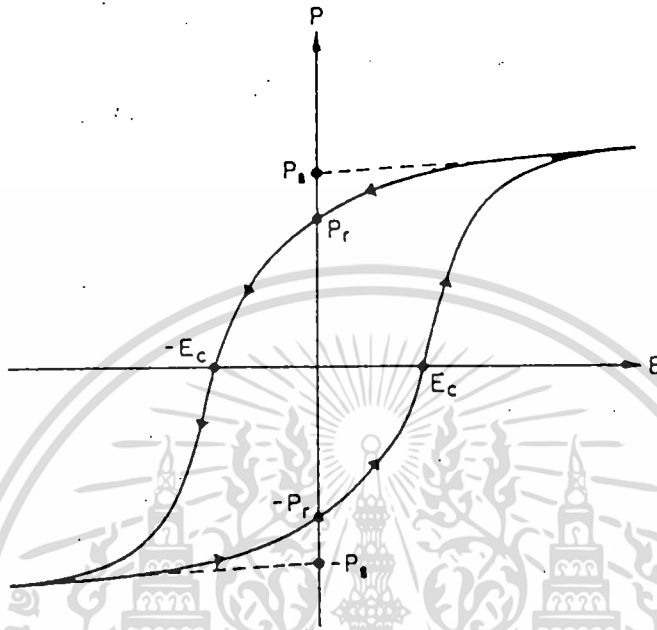
เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative permittivity)

χ_e คือ ค่าซึมซับทางไฟฟ้า (electrical susceptibility)

จากความสัมพันธ์ข้างต้นเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าควรจะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นผลคูณระหว่างค่าซึมซับทางไฟฟ้ากับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ แต่ในทางธรรมชาติของวัสดุแล้วนั้นจะต้องใช้หรือสูญเสียพลังงานไปบางส่วนในการบิดหรือเปลี่ยนแปลงแนวของไดโพล โยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าภายในวัสดุ ดังนั้นกราฟที่ได้แทนที่จะเป็นเส้นตรงจึงมีลักษณะเป็นรูป ฮิสเทอรีซิสลูปดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ตัวแปรสำคัญที่สามารถหาได้จากฮิสเทอรีซิสลูปได้แก่

- (1) Remanent polarization, P_r : เป็นค่าโพลาริเซชันค้าง หรือกล่าวคือเป็นการที่วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ยังคงเกิดโพลาริเซชันค้างอยู่แม้ว่าจะนำเอาสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ออกไปแล้วก็ตาม
- (2) Coercive electric field, E_c : เป็นค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง ที่ใช้ในการทำลายความเป็นโพลาริเซชันค้างค้างอยู่ในวัสดุจนค่าโพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์
- (3) Saturated polarization, P_s : เป็นค่าโพลาริเซชันอิ่มตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากไดโพลไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทุกไดโพลของวัสดุถูกบิดให้มีทิศทางของการโพลาริเซชันไปตามสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้หมดแล้วทุกตัว ดัง

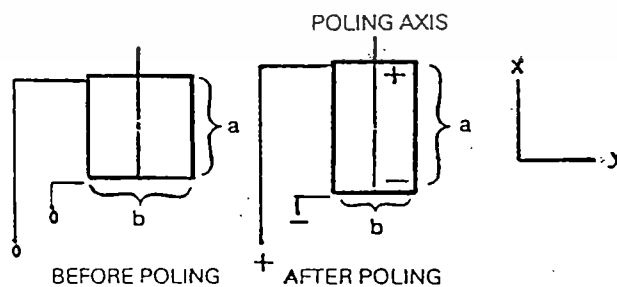
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นถึงแม้ว่าจะป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปมากขึ้นอีกเพียงใดก็ตามมันก็จะไม่เกิดการโพลาริซสูงไปกว่านี้อีกแล้ว

- (4) Relative permittivity, ϵ_{rmax} : เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถหรือความเร็วในการเปลี่ยนแปลงการโพลาริซเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าของวัสดุเพโรอิเล็กทริก กล่าวคือค่า ϵ_r มีค่าสูง จะเห็นว่าในการที่จะหมุนไดโพลหรือทำให้เกิดการโพลาริซทำได้ง่ายหรือใช้สนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็สามารถหมุนไดโพลไฟฟ้าให้เกิดการโพลาริซได้แล้วนั่นเอง ในทางกลับกันถ้าค่านี้มีค่าต่ำจะเห็นว่า การหมุนไดโพลทำได้ยากมากจะต้องใช้สนามไฟฟ้าค่อนข้างสูงมาก การโพลาริซจึงจะเกิดขึ้น

2.1.2 พฤติกรรมของสารเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Action)

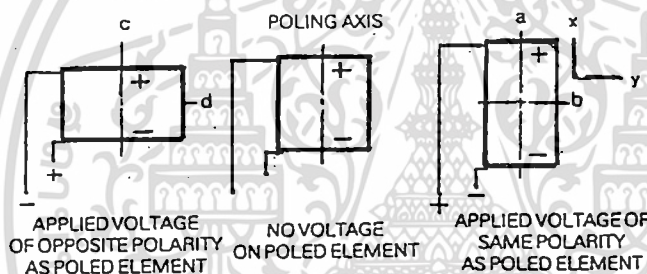
กระบวนการในการเกิดของของสารเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดทิศทางระหว่างขั้วที่ใช้ในการสนามไฟฟ้ากำลังสูงขณะขึ้นรูป (Poling) (พิจารณาตามแนวแกน X) ในรูปที่ 2.2 แกนที่อยู่ระหว่างขั้วในการขึ้นรูป เรียกว่า แกนการ Poling



รูปที่ 2.2 ปราบการ Poling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่กระบวนการเกิดขั้ว(Poling Process) เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว แรงดันที่ใช้งานควรจะอยู่ต่ำกว่าแรงดันการ Poling เท่านั้นจึงจะไม่เปลี่ยนแปลงขนาดของสารเซรามิกหลังจากใช้งาน และการตอบสนองทางกลเป็นไปตามสัญญาณทางไฟฟ้าที่ให้ หากแรงดันที่ป้อนมีขั้วตรงกับแรงดันในการ Poling จะทำให้สารขยายขนาดตามแนวแกนการ Poling(X) และหดสั้นลงในทิศที่ตั้งฉากกับแกนการ Poling(Y) ในทางกลับกันแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับแรงดันในการ Poling จะทำให้สารมีการหดสั้นลงตามแนวแกนการ Poling(X) และขยายในทิศที่ตั้งฉากกับแกนการ Poling(Y) ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ สารเซรามิกจะกลับไปสู่ทิศทางการ Poling เดิมหากนำแรงดันออกจากขั้ว ลักษณะดังกล่าวนี้แสดงดังรูปที่ 2.3

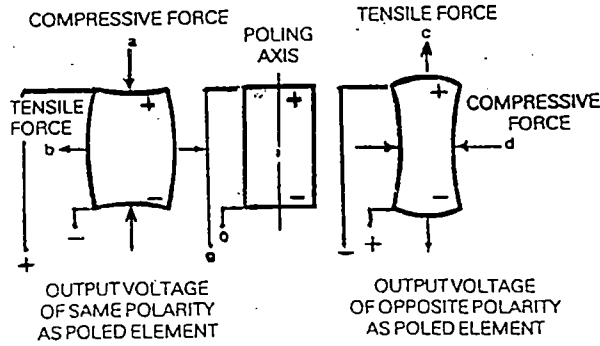


รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงทางกลของสารเพียโซอิเล็กทริกขณะป้อนแรงดัน

2.1.3 แรงดันเพียโซอิเล็กทริก(Piezoelectric Voltage)

หลังจากกระบวนการ Poling เสร็จสมบูรณ์ แรงกดและแรงดึงที่ป้อนให้กับสารเซรามิกจะทำให้สารเกิดแรงดันหรือความต่างศักย์ขึ้น ดังรูปที่ 2.4 แรงดันที่มีขั้วเดียวกับแรงดันในการ Poling เป็นผลมาจาก (a) แรงดันที่ป้อนขนานกับแกนการ Poling หรือ (b) แรงดึงที่ป้อนเข้าไปตั้งฉากกับแกนการ Poling และแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามจะเป็นผลมาจาก (c) แรงดึงป้อนขนานกับแกนการ Poling หรือ (d) แรงกดที่ป้อนเข้าไปตั้งฉากกับแกนการ Poling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของสารเพอโรอิเล็กทริกจากการป้อนแรง

2.1.4 การสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและระยะขจัด (Piezoelectric Ceramic Vibrations and Displacements)

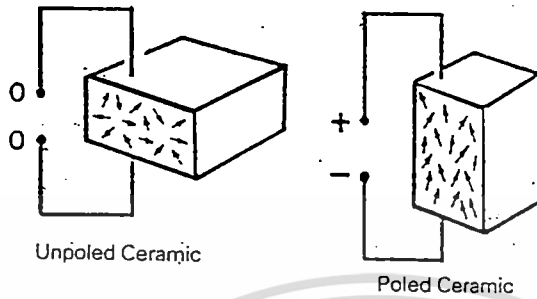
สาร Non-centrosymmetric คือสารที่มีโครงสร้างผลึกไม่สมมาตรที่จุดกึ่งกลาง ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าสุทธิภายใน Unit Cell ขึ้น เราเรียกบริเวณที่ไดโพลเรียงตัวในทิศทางเดียวกันนี้ว่า โดเมน ผลึกเดี่ยวที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมีคุณสมบัติเป็น Anisotropic คือคุณสมบัติของสารจะแตกต่างกันไปตามทิศทางของการวัด ความเป็นเพียโซอิเล็กทริกก็เป็นลักษณะ Anisotropic อย่างหนึ่ง

สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นสารเพอโรอิเล็กทริก Unit Cell จะไม่สมมาตรตรงจุดกึ่งกลางภายใต้อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง และจะสมมาตรตรงจุดกึ่งกลางเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนืออุณหภูมินั้น อุณหภูมิดังกล่าวนี้ เรียกว่า “อุณหภูมิวิกฤตหรืออุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)” กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี สารเหล่านี้ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี สารเซรามิกเหล่านี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบไม่สมมาตรตรงจุดกึ่งกลางหรือแสดงลักษณะเพียโซอิเล็กทริกออกมา

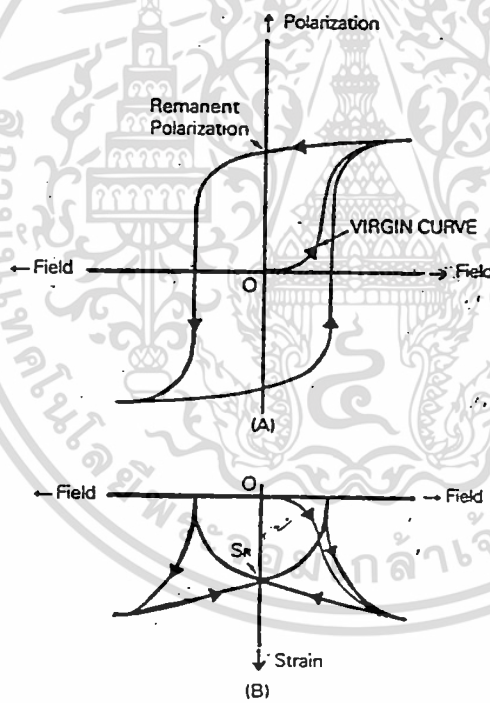
ภายในเซรามิกจะประกอบไปด้วย ผลึกหรือขอบเขตที่มีการเรียงทิศทางไม่เป็นระเบียบโดยผลึกหรือขอบเขตนี้จะมีโดเมนเพียงหนึ่งหรือหลายโดเมนก็เป็นที่ สารที่มีการเรียงทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบจะมีคุณสมบัติ Isotropic และไม่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จากการที่ป้อนขั้วไฟฟ้าและสนามไฟฟ้ากระแสตรงค่าสูงๆ ไดโพลจะเคลื่อนตัวไปเพื่อให้ทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า สารจึงเกิดการโพลาไรเซชันแบบถาวรขึ้น ดังรูปที่ 2.5 มีโดเมนจำนวนไม่มากที่สามารถเรียงไดโพลได้เหมือนกับในผลึกเดี่ยว แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้อาตมันกลายเป็นสารเพียโซอิเล็กทริก หลังจากการ Poling สาร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะยังคงมีโพลาไรเซชันเหลืออยู่ (P_r) และยังคงมีความเค้นเหลืออยู่ (S_r) ดังแสดงในรูป 2.6(A) และ (B)



รูปที่ 2.5 การเรียงตัวของไดโพล



รูปที่ 2.6 (A) แสดงลักษณะของฮิสเทอรีซิสลูป

(B) ลักษณะของความเครียดกับสนามไฟฟ้า

เซรามิกที่ทำการ Poling แล้วจะได้รับความเค้น แลททิซของผลึกหรือขอบเขตที่ได้รับความเครียดเป็นเหตุให้มีบางโดเมนเพิ่มขึ้น คือมีการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดของสารภายในช่วงความถี่ที่แน่นอนใดๆ การเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์จะ
ให้สมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริกสูงขึ้น จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริงเพราะการตอบ
สนองของสารเกือบจะเป็นเชิงเส้น

2.2 คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Characteristics of piezoelectric Ceramics)

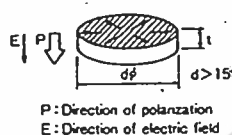
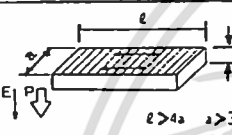
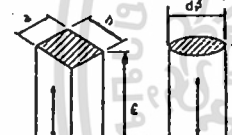
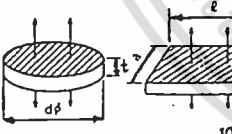
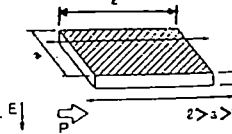
ในการนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไปใช้งาน สิ่งสำคัญคือจะต้องมีความรู้
เพียงพอเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกต่างๆ ก่อนจึงจะสามารถเลือกชนิด
ของสารที่เหมาะสมสำหรับงานด้านต่างๆ ได้ หัวข้อที่กล่าวต่อไปนี้จะอธิบายคุณสมบัติ
ที่สำคัญของสารเพียโซอิเล็กทริก โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย

2.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์ และโหมดการสั่น (Resonant Frequency and Vibration Mode)

หากป้อนสัญญาณแรงดันที่มีความถี่แปรค่าได้ให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก
ที่มีรูปร่างแน่นอน (ทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้า) พบว่ามีความถี่ที่แน่นอนค่าหนึ่งที่ทำให้
เซรามิกเกิดการสั่นอย่างมาก ความถี่นี้เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) จะมีค่าขึ้นอยู่กับ
ความถี่(เรโซแนนซ์) ในการสั่นแบบยึดหยุ่นจำเพาะของเซรามิก โดยความถี่จำเพาะนี้
เป็นฟังก์ชันกับรูปร่างของสาร

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก มีโหมดการสั่นที่แตกต่างกัน (โหมดเรโซแนนซ์)
ขึ้นอยู่กับรูปร่างของสาร ทิศทางการโพลาริเซชันและทิศทางการเรียงตัวของสนามไฟ
ฟ้า แต่ละโหมดการสั่นให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์และคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกต่าง
กัน ตารางที่ 2.1 แสดงโหมดการสั่นทั่วไปที่สัมพันธ์กับรูปร่างของเซรามิก ความถี่เรโซ
แนนซ์ในแต่ละโหมดการสั่นและสัญลักษณ์ค่าคงที่ของสาร

ตาราง 2.1 โหมดการสั่นและค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริก

Vibration Mode	Shape/Vibration Mode	Resonant Frequency (fr)	Material Constant Symbol					
			k	d	g	Y ^E	ε ^T	N
Radial Mode	 <p>P: Direction of polarization E: Direction of electric field</p> <p>The disk with radial vibration mode. Polarization is oriented along the thickness of the disk.</p>	$\frac{N_1}{d}$	K_r	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_1
Length Mode	 <p>Thin rectangular plate, with the direction of vibration orthogonal to the polarization axis and with a single point of resonance.</p>	$\frac{N_2}{l}$	K_{31}	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_2
Longitudinal Mode	 <p>Square and cylindrical columns. Vibration is oriented along the direction of polarization. Only a single point of resonance.</p>	$\frac{N_3}{l}$	K_{33}	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_3
Thickness Mode	 <p>Disk and rectangular plates which are thin compared to their surface areas. They have multiple points of resonance in longitudinal vibration mode.</p>	$\frac{N_4}{t}$	K_t	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_4
Shear Mode	 <p>Disk or rectangular plates, with the electric field orthogonal to the direction of polarization, causing a shear vibration along the surface.</p>	$\frac{N_5}{t}$	K_{15}	d_{15}	g_{15}	Y_{44}^E	ϵ_{11}^T	N_5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริก มีความหมายดังนี้

N: ค่าคงที่ความถี่(Frequency constant)

d: ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก(Piezoelectric Strain Constant)

g: ค่าคงที่แรงดันเอาต์พุต(Voltage Output Constant)

k: สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล(Electromechanical Coupling)

Y^E : ค่ามอดูลัสของ Young(Young's modulus)

ϵ^T : ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก(Dielectric Constant)

เมื่อสารเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น T จะเกิดโพลาริเซชัน P ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเค้นนั้น $T : P = dT$ (เมื่อ d คือ ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก) ลักษณะเช่นนี้ก็คือ “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก” ในทางตรงข้ามเมื่อสารเพียโซอิเล็กทริกได้รับสนามไฟฟ้าจากขั้ว จะเกิดความเครียด S ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้า $E : S = dE$ ซึ่งก็คือ “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ” นั่นเอง สำหรับสารที่มีความยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ของความเครียด S กับความเค้นถูกกำหนดโดย $S = s^E T$ (s^E คือ Compliance); สำหรับสารไดอิเล็กทริกความสัมพันธ์ของระยะขจัดทางไฟฟ้า D กับสนามไฟฟ้า E ถูกกำหนดโดย $D = \epsilon E$ สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกความสัมพันธ์เหล่านี้จะถูกกำหนดโดยสมการ (2.3) ทั้งสองสมการจะสัมพันธ์กับค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก ดังนี้

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \\ D_n &= d_{nj} T_j + \epsilon_{nm}^T E_m \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ $m, n = 1, 2, 3$; $i, j = 1, 2, \dots, 6$

สมการเหล่านี้ เป็นสมการพื้นฐานของสารเพียโซอิเล็กทริก เมื่อสนามไฟฟ้า E และ ระยะขจัดทางไฟฟ้า D แสดงขนาดของเวกเตอร์ ขณะที่ความเค้น T และ ความเครียด S คือขนาดแรงดึงที่สมมาตร เมื่อพิจารณาสมมาตรของผลึก สมการที่ 2.3 ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกลดรูปให้ง่ายลง เนื่องจากค่าคงที่บางตัวในสมการจะถูกตัดทิ้ง และ ค่าคงที่ตัวอื่นบางตัวจะเท่ากับค่าคงที่ในชุดที่ 3

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีแกนการโพลาไรซ์ ตามแนวแกน Z (3) และให้อีก 2 แกนที่

ตั้งฉากกับแกน Z เป็น แกน X (1) และ Y (2) โครงสร้างผลึกของเซรามิกสามารถถูกแทนได้ในลักษณะเช่นเดียวกันกับผลึก (6mm.) ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นศูนย์และไม่ขึ้นกับค่าใดๆ คือค่าคงที่ 10 ตัวดังนี้

$$S_{11}^E \left(\frac{1}{Y^E} \right), S_{12}^E \left(\frac{1}{Y^E} \right), S_{13}^E \left(\frac{1}{Y^E} \right), S_{33}^E \left(\frac{1}{Y^E} \right), S_{44}^E \left(\frac{1}{Y^E} \right), d_{31}, d_{33}, d_{15}, \varepsilon_{11}^T, \varepsilon_{33}^T$$

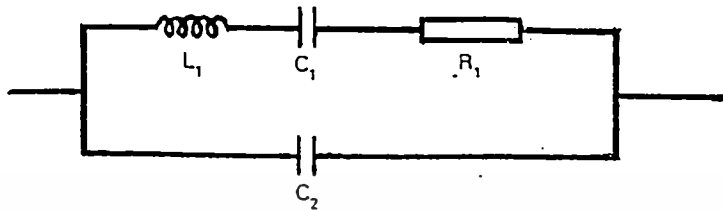
ตัวอย่างสมการเพียโซอิเล็กทริกพื้นฐาน สำหรับการสั่นตามยาวของเซรามิกแผ่นสี่เหลี่ยมจะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11}^T T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 &= d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \quad (2.4)$$

ทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก สามารถแทนโดยวงจรมมูลซึ่งได้จาก สมการเพียโซอิเล็กทริกพื้นฐานที่แทนโหมดการสั่น วงจรนี้เรียกว่า วงจรมมูลของ Maison โดยทั่วไปวงจรมมูลที่ใช้แทนสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก แสดงดังรูปที่ 2.7 ในวงจรมมูลนี้ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม f_s และความถี่เรโซแนนซ์ขนาน f_p จะกำหนดโดยสมการ

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \\ f_p &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ค่าคงที่ f_s และ f_p เป็นค่าที่จำเป็นในการหาค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล(k)



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริก

ความถี่เรโซแนนซ์ สามารถนิยามได้ใน 3 วิธี คือ

- (1) ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม f_s ของวงจรอนุกรมสมมูลสำหรับทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก
- (2) ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำลง f_r คือการลดลงของความถี่ทั้งสอง เมื่อค่า Admittance ที่คร่อมขั้ว หรืออิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์ที่สร้างจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกอยู่ในเฟสที่เป็นศูนย์ (Null Phase)
- (3) ความถี่ Admittance สูงสุด f_m เมื่อค่า Admittance ที่คร่อมโหลดของทรานสดิวเซอร์ที่สร้างจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีค่ามากที่สุด (ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด)

แต่อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างความถี่ทั้ง 3 ตัว f_s , f_r และ f_m จะน้อยมากจนละทิ้งได้ ในกรณีที่ใช้จริงเมื่อเราวัดความถี่ f_m มันอาจเรียกได้เป็นความถี่เรโซแนนซ์ f_r ในทำนองเดียวกันความถี่ Admittance ต่ำสุด f_n อาจเรียกได้ว่าเป็นความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (Antiresonant Frequency) f_a

ความถี่เรโซแนนซ์ f_r สามารถที่จะวัดได้จากวงจร ต่อไปนี้

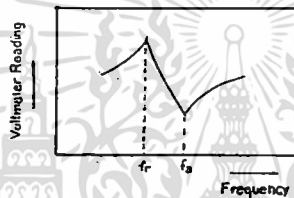
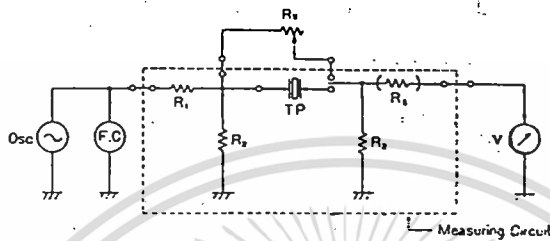
(a) วิธีการวัดโดยใช้วงจรแรงดันคงที่

ในรูป 2.12 ตัวกำเนิดความถี่ Oscillator และตัวต้านอินพุท R_1 และ R_2 นำมาใช้เพื่อที่จะป้องกันสัญญาณแรงดันคงที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก กระแสที่ไหลผ่านทรานสดิวเซอร์จะถูกวัดคร่อมตัวต้านทาน R_2 ญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

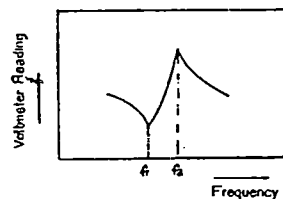
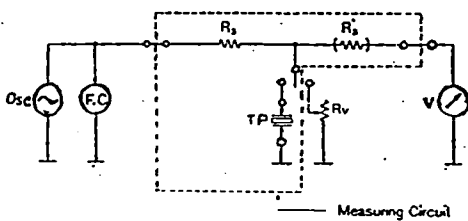
ถ้าอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์สูงกว่า R_2 มาก ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์จะแปรผันกับค่า Admittance ของทรานสดิวเซอร์ ความถี่ที่โวลต์มิเตอร์อ่านได้ที่ค่าสูงสุดคือ ความถี่เรโซแนนซ์ f_r และความถี่ที่อ่านได้ต่ำสุดก็คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ f_a

ตัวต้านทานปรับค่าได้ R_v จะใช้ในการหาค่าความต้านทานเรโซแนนซ์ R_1 ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ในการคำนวณหาค่าเชิงกล (Mechanical) Q_m



รูปที่ 2.8 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีแรงดันคงที่

ถ้าวงจรวัด f_r ใช้แหล่งกำเนิดกระแสคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ตัวต้านทาน R_3 จะควบคุมกระแสที่ไหลผ่านทรานสดิวเซอร์ที่ทำจากสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ถ้า R_3 สูงกว่าอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์มาก ค่าที่โวลต์มิเตอร์อ่านได้จะแปรผันตรงกับอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์ ความถี่เมื่อค่าที่อ่านได้น้อยที่สุด คือ ความถี่เรโซแนนซ์ f_r และความถี่เมื่อค่าที่อ่านได้สูงสุดคือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ f_a



- Osc : Oscillator
- F.C. : Frequency Counter
- R_v : Variable Resistor
- T.P. : Transducer
- V : Voltmeter
- R_2 : 100 Ω (Reference Value)
- R_3 in the output circuit may be omitted.

รูปที่ 2.9 ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีกระแสคงที่

2.2.2 ค่าคงที่ความถี่ (Frequency Constant : N)

ความเร็วของเสียงซึ่งแพร่กระจายผ่านสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละโหมดการสั่น เมื่อเรโซแนนซ์ของโหมดการสั่นอื่นๆ มีค่าแตกต่างกันไป สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีรูปร่างแน่นอน ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น λ ของการสั่นกับความยาวในการแพร่ 1 ที่จุดเรโซแนนซ์จะเป็นไปตามสมการ 2.6 เนื่องจากความเร็วของเสียงเป็นค่าคงที่ ทำให้ได้สมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8

$$\frac{\lambda}{2} = l \quad (2.6)$$

$$v = f_r \lambda \quad (2.7)$$

$$f_r l = \frac{v}{2} = N \quad (2.8)$$

เมื่อ N คือ ค่าคงที่ความถี่ ค่า N ขึ้นอยู่กับโหมดการสั่น ความถี่เรโซแนนซ์อาจหาได้จากสมการ $f_r = N/l$ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.3 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d และ g

(a) ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก d

ค่าคงที่ความเครียดของสารเพียโซอิเล็กทริก จะบอกถึงขนาดของ strain ที่เกิดขึ้นจากการ applied สนามไฟฟ้าแก่สารเพียโซอิเล็กทริก สารเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่า d มากสามารถนำไปใช้เป็นตัวที่จะจ่าย acoustic wave ได้ดี ในบางครั้งจึงเรียกว่า transmitting constant ค่า d จะ กำหนดโดยสมการ 2.9

$$d = k \sqrt{\frac{\epsilon^T}{Y^E}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ϵ^T = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
 Y^E = ค่ามอดูลัสของ Young (N/m^2)
 k = สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{Y_{11}^E}} \quad d_{33} = k_{33} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{Y_{33}^E}} \quad d_{15} = k_{15} \sqrt{\frac{\epsilon_{11}^T}{Y_{44}^E}} \quad (2.10)$$

(b) ค่าคงที่แรงดันเอาท์พุท g

ค่าคงที่แรงดันเอาท์พุท จะบอกถึงขนาดของสนามไฟฟ้าหรือแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่ฉาบอยู่ที่ผิวของสารเพียโซอิเล็กทริกเมื่อมีการป้อนความเค้นโดยสารเพียโซอิเล็กทริกที่มี g มาก สามารถนำไปใช้เป็นตัวรับ acoustic wave ได้ดี ในบางครั้งจึงเรียกว่า receiving constant ค่า g จะกำหนดโดยสมการ

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \quad (2.11)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T}, \quad g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T}, \quad g_{15} = \frac{d_{15}}{\epsilon_{11}^T} \quad (2.12)$$

ค่าคงที่ d และ g ขึ้นอยู่กับโหมดการสั่น และค่าคงที่ในแต่ละโหมดการสั่นจะกำหนดจากสัญลักษณ์ที่แสดงในตารางที่ 2.1

ระยะขจัดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันไฟฟ้า หรือ แรงดันที่เกิดขึ้นภายใต้แรงที่ป้อนให้ สามารถกำหนดโดยค่าคงที่ d และ g ตัวอย่างเช่นระยะขจัด Δl เกิดจากการป้อนแรงดัน V เข้าไปคร่อมขั้วในโหมดการสั่นตามยาวมีค่า

$$\Delta l = d_{31} \frac{l}{t} V \quad (2.13)$$

ในทางกลับกัน แรงดัน V ที่เกิดจากการป้อนแรง F เข้าไปตามทิศทางของการสั่น มีค่า

$$V = g_{31} \frac{1}{a} F \quad (2.14)$$

2.2.4 สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล (Electromechanical Coupling Coefficient : k)

สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า-กล คืออัตราส่วนของ mechanical energy ที่เปลี่ยนไปเป็น electrical energy ต่อ input mechanical energy หรือในทางกลับกันคืออัตราส่วนของ electrical energy ที่เปลี่ยนไปเป็น mechanical energy ต่อ input electrical energy piezoelectric materials ที่มีค่า k มาก แสดงว่าเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็น wave pulse หรือในทางกลับกันเปลี่ยน wave pulse energy ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่า k มาก จะสามารถนำไปใช้เป็น transducer ได้ดี

$$k = \sqrt{\frac{\text{Accumulated Mechanical Energy}}{\text{Supplied Electrical Energy}}}$$

ค่า k ขึ้นอยู่กับโหมดการสั่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สามารถหาค่าได้จากสมการที่ใช้ความถี่ เรโซแนนซ์ f_r ความถี่เรโซแนนซ์จากการวัดด้วยวิธีแรงดันคงที่ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ f_a และ ความแตกต่างของทั้งสอง $\Delta f = f_a - f_r$

(a) การสั่นแนวรัศมีของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแผ่นกลมบาง

$$k_r^2 \approx 2.529 \frac{\Delta f}{f_r} \quad (2.15)$$

(b) การสั่นตามความยาวของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมบาง

$$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = -\frac{\pi f_a}{2 f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2 f_r}\right) \quad (2.16)$$

(c) การสั้นตามยาวของทรานสดิวเซอร์แบบทรงกระบอก

$$k_{33}^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \quad (2.17)$$

(d) การสั้นตามความหนาของทรานสดิวเซอร์แบบแผ่นกลมบาง

$$k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right) \quad (2.18)$$

(e) การสั้นแบบเฉือนของทรานสดิวเซอร์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมบาง

$$k_{15}^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right) \quad (2.19)$$

2.2.5 ค่าเชิงกล (Mechanical : Q_m)

ค่าเชิงกล Q_m ให้ค่าความชันของเรโซแนนซ์ของการสั้นเชิงกลรอบความถี่เรโซแนนซ์ มีค่าเป็นดังสมการ

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_f \left[1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2\right]} \quad (2.20)$$

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานเรโซแนนซ์

C_f คือ ค่าความจุอิสระที่คร่อมขั้วทั้ง 2

2.2.6 ค่ามอดูลัสของ Young (Young's Modulus : Y^E)

เมื่อความเค้น(T) ถูกป้อนให้กับวัตถุยืดหยุ่นภายในช่วงที่ยืดหยุ่นเป็นเชิงเส้น

ความเครียด(S) มีค่าตามสูตรสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = s^E T \quad (2.21)$$

s^E คือ ค่าคงที่ความยืดหยุ่น (Compliance) และ ค่ามอดูลัสของ Young จะเป็นส่วนกลับของ Compliance นี้ สำหรับการสันตามความยาวในตารางที่ 2.1 ค่ามอดูลัสของ Young จะถูกกำหนดโดยสมการ

$$Y_{11}^E = (2lf_r)^2 \rho = v^2 \rho \quad (2.22)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

v คือ ความเร็วเสียง (m/s)

2.2.7 อัตราส่วนของ Poisson (Poisson's Ration : δ^E)

เมื่อป้อนความเค้นคงที่ T เข้าไปในวัตถุยืดหยุ่น ภายในช่วงการยืดหยุ่นเป็นเชิงเส้น อัตราส่วนของ Poisson นิยามว่าเป็น อัตราการบิดเบี้ยวไปของวัตถุที่ตั้งฉากกับความเค้น

$$\delta^E = \frac{\text{Distortion Rate Orthogonal to Stress}}{\text{Distortion Rate along Stress}}$$

2.2.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant : ϵ^T)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก คือ ระยะเวลาจัดทางไฟฟ้าเป็นผลจากการป้อนสนามไฟฟ้าหนึ่งหน่วยโดยการป้อนนี้ไม่มีความเค้นเกิดขึ้น มีค่าเป็นไปตามสมการ

$$D = \epsilon^T E \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ^T กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสูญญากาศ ϵ_0 ($=8.854 \times 10^{-12}$ F/m) เรียกว่า “ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์” ในกรณีของโหมดการสั้นตามความยาวที่แสดงในตารางที่ 2.1 ถ้าความจุอิสระที่คร่อมขั้วที่ 1 kHz เท่ากับ C_f ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ สำหรับสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับโพลาริเซชัน จะเป็นไปตามสมการ

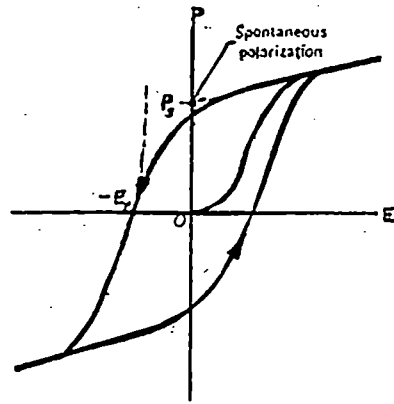
$$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = \frac{C_f t}{l a \epsilon_0} \quad (2.24)$$

กรณีการสั้นตามความหนา ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สำหรับสนามที่ตั้งฉากกับทิศทางการโพลาริเซชัน จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\epsilon_{11}^T}{\epsilon_0} = \frac{C_f t}{l a \epsilon_0} \quad (2.25)$$

2.2.9 สนามไฟฟ้าบังคับ (Coercive Field : E_c)

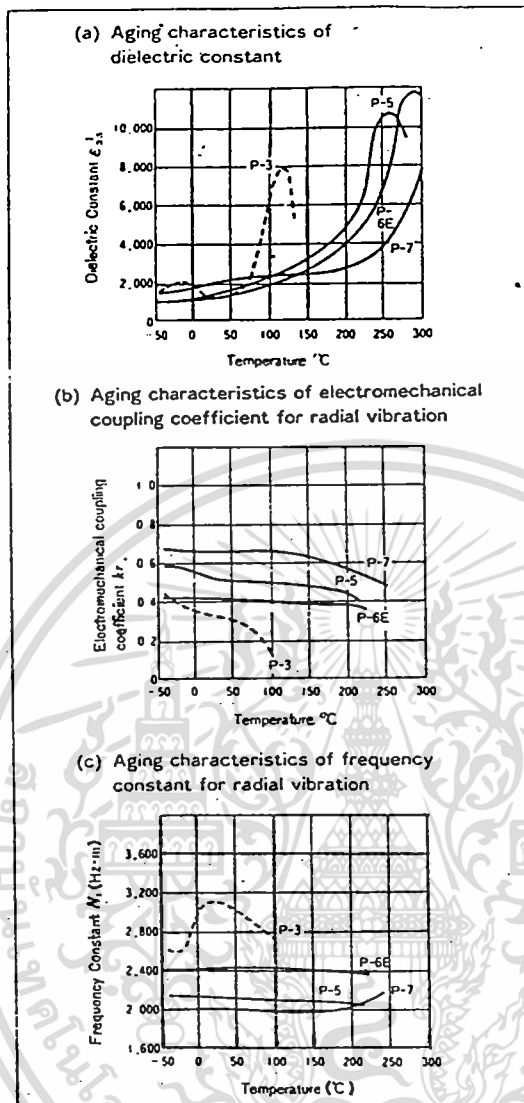
สารเฟอร์โรอิเล็กตริกมีโครงสร้างเป็นโดเมน โดโพลโมเมนต์ในแต่ละโดเมนจะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และเป็นเหตุให้เกิดการโพลาริเซชันเอง (Spontaneous Polarization) ความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าได้กับการเปลี่ยนแปลงการโพลาริเซชันทั้งหมด จะอยู่ในรูปของ “Hysteresis Loop” ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ครั้งแรกที่สารได้รับสนามไฟฟ้ามันจะยังไม่กลับไปสู่โครงสร้างของโดเมนในตอนเริ่มแรกเมื่อสนามไฟฟ้าถูกนำออกไปเป็นผลทำให้เกิดการโพลาริเซชันคงค้างอยู่ P_r ในการทำให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างอยู่ (P_r) นั้นหมดไปจะต้องป้อนสนามไฟฟ้าผันกลับ (ทิศทางตรงกันข้าม) ที่มีความเข้มคงที่ค่าหนึ่ง เข้าไปเพื่อใช้ในการหักล้าง ค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้นี้ เรียกว่า สนามไฟฟ้าบังคับ : E_c



รูปที่ 2.10 Hysteresis Loop ของสารเฟอโรอิเล็กทริก

2.2.10 การ Aging

สมบัติส่วนมากของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะเปลี่ยนแปลงทีละน้อยกับเวลา หลังจากการ Poling การเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบลอการิทึม (Logarithmic) กับเวลา อัตราการ Aging ของคุณสมบัติต่างๆ ขึ้นกับส่วนประกอบของสารเซรามิกและวิธีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ในการ Aging ค่าที่แน่นอนของสมบัติต่างๆ เช่นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) การคับปลิ่ง และค่าคงที่ของสารเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าเฉพาะที่ค่าเวลามาตรฐานหลังจากการ Poling หากใช้เวลาหลังจากการ Poling นานขึ้น สารจะมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของลักษณะของอุณหภูมิของสารต่างๆ



รูปที่ 2.11 ลักษณะอุณหภูมิของสารต่างๆกับการ Aging

2.2.11 อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)

อุณหภูมิคูรี คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์สูงสุดของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก สารเซรามิกแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิคูรีเฉพาะ เมื่อสารเซรามิกถูกทำให้ร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี สมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะหมดไปกลายเป็นสารพาราอิเล็กทริก (Paraelectric) ดังนั้นอุณหภูมิในการใช้งานจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ชนิด รูปแบบ และการนำสารเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งาน

2.3.1 ชนิดของทรานสดิวเซอร์

มีการนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีหลายชนิดมาใช้ประโยชน์ แต่ละชนิดจะถูกทำให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ทำโดยการเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของเซรามิกเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะด้าน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งสารเซรามิกออกได้เป็น 3 กลุ่ม

1. วัสดุแข็ง (Hard Material)
2. วัสดุอ่อน (Soft Material)
3. วัสดุที่สั่งทำขึ้นพิเศษ (Custom Material)

วัสดุแข็งที่มีกำลังสูง (High Power “Hard” Material)

เซรามิกที่แข็งและมีกำลังสูง ส่วนใหญ่จะเป็นพวก Lead zirconium titanate จะสามารถทนต่อการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าหรือความเค้นได้สูง สารเหล่านี้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันกำลังสูงและทรานสดิวเซอร์

PZT – 4D (ชนิดที่ใช้ทางการทหารแบบ I)

วัสดุชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ทำเป็น Ultrasonic Cleaner ตัวทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค และการประยุกต์ใช้การแพร่กระจายเสียงกำลังสูง PZT-4D เลดเซอร์โคเรตทิตาเนตสามารถให้แอมพลิจูดในการขับเชิงกลสูง และมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำ

PZT – 8 (ชนิดที่ใช้ทางการทหารแบบ III)

วัสดุนี้ใช้ในงานกำลังสูง แม้ว่าจะดับความสามารถจะต่ำกว่า PZT-4D เพียงเล็กน้อย แต่คุณภาพเชิงกลสูง และมีแฟกเตอร์การสูญเสียต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุอ่อนที่มีความไวสูง (High Sensitivity “Soft” Materials)

สารเซรามิกอ่อนจะมีความไวและค่า permittivity สูง แต่ภายใต้สภาวะการขับสูง จะเกิดความร้อนขึ้นภายในสารในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน วัสดุเหล่านี้จะใช้เป็นตัวตรวจวัดต่างๆ เช่น ทรานสดิวเซอร์กำลังต่ำ และตัวรับสัญญาณ วัสดุประเภทนี้เช่น

PZT – 5A (ชนิดที่ใช้ในทางการทหารแบบ II)

วัสดุนี้จะใช้เป็นตัวรับสัญญาณหรือส่วนกำเนิดสัญญาณในไฮโดรโฟน, ตัววัดความเร่ง, ตัวตรวจวัดการสั่น PZT-5A คือ เลดเซอร์โคเรเนตทิตานเนตที่มีความไว ค่า Permittivity และความคงที่กับเวลาสูง

PZT – 5J (ชนิดที่ใช้ทางการทหารแบบ V)

สารนี้ใช้ในพีวล์, ไฮโดรโฟน และการประยุกต์ในด้านอื่น ๆ ที่ต้องการการรวมพลังงาน และแรงดันเอาต์พุตสูง PZT-5J คือ เลดเซอร์โคเรเนตทิตานเนตที่มีค่า Permittivity และค่าคงที่แรงดันเพียโซอิเล็กทริกสูง

PZT – 5H (ชนิดที่ใช้ทางการทหารแบบ VI)

สารนี้ใช้ในตัวรับสัญญาณที่ไว ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และงานด้านอื่นๆ อย่างกว้างขวางจากไฮโดรโฟนจนถึงเครื่องพิมพ์แบบใช้หมึกชนิด PZT-5H จะให้ค่า Permittivity, ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบและค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกสูง มีอุณหภูมิคูรีในบรรดาวัสดุที่อ่อนทั้งหมด (หรือตระกูล PZT-5) ซึ่งทำให้เกิดการจำกัดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน และมีความเสถียรกับเวลาต่ำ

PZT – 5R

สารนี้จะใช้แทน PZT-5A เมื่อต้องการความไวสูงขึ้นกว่า PZT-5R มีความไวต่อเสียง, สัมประสิทธิ์คู่ควบ และค่า Permittivity สูง

วัสดุที่สั่งทำขึ้นพิเศษ (Custom Material)

วัสดุเซรามิกหลายชนิดถูกสร้างขึ้น เพื่อให้ได้สมบัติตรงตามต้องการกับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน เช่น เลดเซอร์โคเรเนตทิตานเนตที่สังวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PZT – 7A

PZT-7A คือ เลดเซอร์โคเรเนตทิตานเนตที่มีสัมประสิทธิ์คู่วบแบบเฉือนสูงมีค่า Permittivity ต่ำ และมีความคงที่กับอุณหภูมิสูง ลักษณะการ Aging ต่ำ (เสถียรกับเวลาสูง) จะให้การเพี้ยนไปของเฟสน้อยลงในวงจรเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า

PT 2 – เลดทิตานเนต

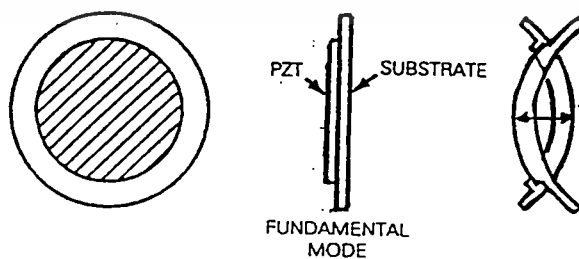
เลดทิตานเนตที่ทำงานจะมีความไวสูงในแกนการ Poling (โหมด “33”) และมีความไวต่ำในโหมด “31” สิ่งนี้ทำให้สารเหมาะที่จะถูกใช้งานในโหมด Hydrostatic การประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน และไฮโดรโฟน

2.3.2 รูปแบบของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่นำมาใช้งาน

สารเพียโซอิเล็กทริกที่ถูกนำมาใช้งานมักมีขนาดเล็ก ค่าที่ให้ได้สูงสุดของส่วนประกอบเพียง 1 ตัวจะอยู่ในระดับไมครอน ดังนั้นจึงต้องทำการขยายโดยการจัดเรียงสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในลักษณะต่างๆ เช่น Unimorph, Bimorph และ Stack

1. Unimorph

Unimorph จะทำงานขึ้นโดยการติดแผ่นบางๆ ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกับฐานรองที่ไม่ไว การขยับสารเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งหมด ลักษณะแบบ Unimorph นี้เหมาะสำหรับใช้สร้างเป็นไฮโดรโฟน, ตัวตรวจวัด และ Actuator

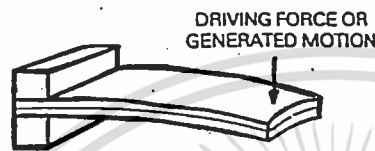


รูปที่ 2.12 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Unimorph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Bimorphs

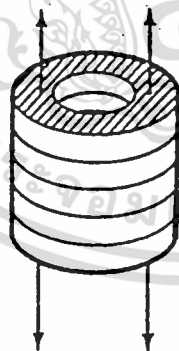
Bimorph ทำขึ้นโดยติดสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเข้าด้วยกัน 2 ชั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในความยาวของสารทั้ง 2 ชั้น สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างมาก ปกติจะอยู่ในช่วงที่เกินกว่า $10 \mu\text{m/V}$



รูปที่ 2.13 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Bimorph

3. Actuator Stacks

Stack เป็นการนำสารเพียโซอิเล็กทริกมาต่ออนุกรมในเชิงกล และขนานกันในเชิงไฟฟ้ากันหลายๆ ชั้น ระยะเวลาของทรานสดิวเซอร์แต่ละตัวรวมกันเท่ากับระยะทั้งหมด Stack โดยทั่วไปต้องใช้ในงานที่ต้องการระยะที่ยาว (ปกติระหว่าง 5 และ 180 mm.)



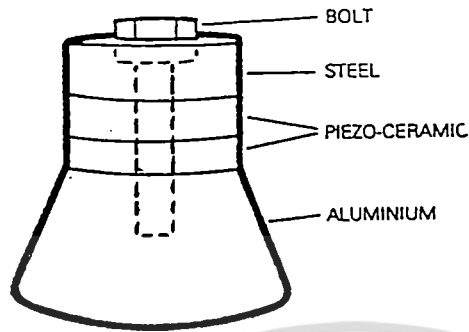
รูปที่ 2.14 ลักษณะการจัดเรียงสารแบบ Stack

4. Sandwich Transducers

เป็นการยากที่จะทำให้บล็อกลึกเดี่ยวของเซรามิกเกิดการเรโซแนนซ์ที่มีความถี่ต่ำกว่า 100kHz การใช้งานตัวเรโซเนเตอร์แบบ Composite Half Wave จะใช้ประกอบกับเพีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซอิลีคทรอิกเซรามิกแบบ 2 วงแหวนหรือมากกว่าเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นโลหะ การจัดเรียงแบบนี้ทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่ต่ำได้



รูปที่ 2.15 ทรานสดิวเซอร์ที่มีลักษณะแบบ Sandwich

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

การประยุกต์ใช้สารเพียโซอิเล็กทริก มักจะใช้สารเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบ polycrystal แทนสารเพียโซอิเล็กทริกทั่วไป เนื่องจากสารเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นเซรามิกเหล่านี้มีประโยชน์เหมาะสมในการใช้งานมากกว่า จากลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของสารแต่ละชนิดสามารถถูกนำมาแยกออกเพื่อใช้ในแต่ละงาน เซรามิกมีความแข็งแรง และทน และสามารถสร้างขึ้นได้ในเกือบทุกขนาดและทุกรูปทรงที่ต้องการ ไม่ไวต่อสารเคมี และสามารถป้องกันความชื้นและสภาพบรรยากาศต่างๆ ได้ดี

แบเรียมทิตาเนต ($BaTiO_3$) ที่เป็นสารเซรามิกที่นำมาใช้เป็น ultrasonic transducer และ เมื่อไม่นานมานี้ได้เกิดสารใหม่ในกลุ่มของเลดทิตาเนต เลดเซอร์โคเรเนต (lead titanate, lead zirconate; $PbTiO_3$. $PbZrO_3$) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า-กล และมีเสถียรภาพ (รวมถึงลักษณะที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ) สูงกว่าสารอื่นๆ ที่มีอยู่ การประยุกต์ใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เมื่อเปรียบเทียบกับสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่นๆ

ข้อดีของ $BaTiO_3$ และ $PbTiO_3$. $PbZrO_3$ คือ

1. มีประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณไฟฟ้า-กลสูง (High electromechanical transformation efficacy)

2. การมีความสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ดี เช่น ทำเป็นแผ่นบางๆ ได้ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไมโครชิป เป็นต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ช่วงกว้างของการใช้งาน สามารถกำหนดได้จากส่วนประกอบของสารที่แตกต่างกัน (มีค่า degree of freedom อยู่ในช่วงกว้าง จึงสามารถใช้งานได้หลากหลาย)
4. มีเสถียรภาพสูง
5. เหมาะสำหรับใช้เป็นสาร ในเชิงเศรษฐกิจ คือสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานและวงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis Loop

2.4.1 หลักการพื้นฐานในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.16 ลักษณะของแรงดัน(V) กับเวลา(t)

ในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริกทำได้โดยการป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มสูง (E) ในรูปของสัญญาณแรงดันสูงที่ค่าแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงกับเวลา ลักษณะของรูปสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.16 เข้าไปในสารเพียโซอิเล็กทริก แล้วทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า ในรูปของประจุไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น ค่าประจุ Q นี้สัมพันธ์กับ โพลาไรเซชัน P ดังสมการ

$$P = \frac{Q}{A} \quad (2.26)$$

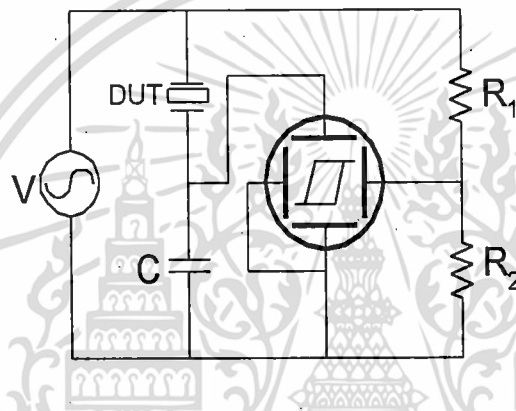
นำการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน P ในรูปของสัญญาณประจุที่วัดได้พลอตกับสนามไฟฟ้า E ที่อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดัน จะได้ลักษณะที่แสดงถึงสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก คือการเกิด Hysteresis Loop ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 วงจรเบื้องต้นในการวัด P-E Hysteresis Loop จากสารเพียโซอิเล็กทริก

วงจร Sawyer-Tower

ในการวัดหา P-E ฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเราใช้วงจรพื้นฐานของ Sawyer และ Tower แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจร Sawyer-Tower

จากรูปแรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป กำหนดให้เป็น V_x สำหรับแรงดันในแนวแกน x (หรือแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_2) และ V_y สำหรับแรงดันในแนวแกน y (หรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C) โดยความสัมพันธ์ของ V_x และ V_y กับสนามไฟฟ้า E, โพลาริเซชัน P และ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ϵ_r แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$V_x \text{ กับ } E: \quad V_x = \frac{VR_2}{R_1 + R_2} \quad (2.27)$$

$$V = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} V_x \quad (2.28)$$

$$E = \frac{V_x}{d} = \frac{V - V_y}{d} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d คือความหนาของวัสดุเฟอโรอิเล็กทริกตัวอย่าง
 V_s คือแรงดันตกคร่อมวัสดุนั้น

เพื่อพิจารณาให้ง่ายเข้า ในการทดลองจึงควรเลือกใช้ค่าความเก็บประจุ C ที่มีค่าสูงกว่าความเก็บประจุของวัสดุเฟอโรอิเล็กทริก C_s มากๆ จะทำให้แรงดันตกคร่อมส่วนใหญ่วัตถุที่วัสดุเฟอโรอิเล็กทริก เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$E = \frac{V}{d} \quad \text{เมื่อ } C \gg C_s \quad (2.30)$$

$$E = \frac{(R_1 + R_2)}{dR_2} V_x \quad (2.31)$$

V_x กับ P :
 จากสมการ

$$D = \epsilon E + P \quad (2.32)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$P = D - \epsilon_0 E \quad (2.33)$$

เมื่อ D คือ electric displacement หรืออัตราส่วนระหว่างประจุต่อพื้นที่ $= \frac{Q}{A}$ และ

$D = \epsilon_r \epsilon_0 E$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$P = \frac{Q_s}{A_s} - \epsilon_0 E \quad (2.34)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเฟอโรอิเล็กทริก

Q_s คือประจุที่สะสมอยู่ในวัสดุนั้น โดยมีค่าเท่ากับความเก็บประจุของวัสดุ คูณอยู่

กับแรงดันที่ตกคร่อม $= CV$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก และตัวเก็บประจุ C ต่ออนุกรมกันอยู่ ดังนั้นทั้งสองจึงมีประจุ Q เก็บอยู่เท่ากันนั่นคือ $Q_s = Q_c$ และ Q_c มีค่าเท่ากับ CV_y สรุปได้ว่า

$$P = \frac{CV_y}{A_s} - \epsilon_0 \frac{(R_1 + R_2)}{dR_2} V_x \quad \text{เมื่อ } C \gg C_s \quad (2.35)$$

แต่เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสูญญากาศมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นเราจึงสามารถพิจารณาโดยตัดเทอมหลังได้เป็นดังสมการ

$$P = \frac{CV_y}{A_s} \quad (2.36)$$

V_x, V_y กับ ϵ_r :

จาก

$$Q = CV_y = DA = \epsilon_r \epsilon_0 EA \quad (2.37)$$

$$V_y = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 EA}{C} \quad (2.38)$$

$$V_y = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 AV}{Cd} \quad (2.39)$$

$$V_y = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{Cd} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_x \quad (2.40)$$

$$\frac{V_y}{V_x} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{Cd} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad (2.41)$$

$$\epsilon_r = \frac{V_y}{V_x} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{Cd}{\epsilon_0 d} \right) \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการพิสูจน์ข้างต้นทำให้เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวัสดุ (E), ค่าโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ (P) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ได้เมื่อหาแรงดันในแนวแกน x และในแนวแกน y จากสมการที่ (2.31), (2.36) และ (2.42)



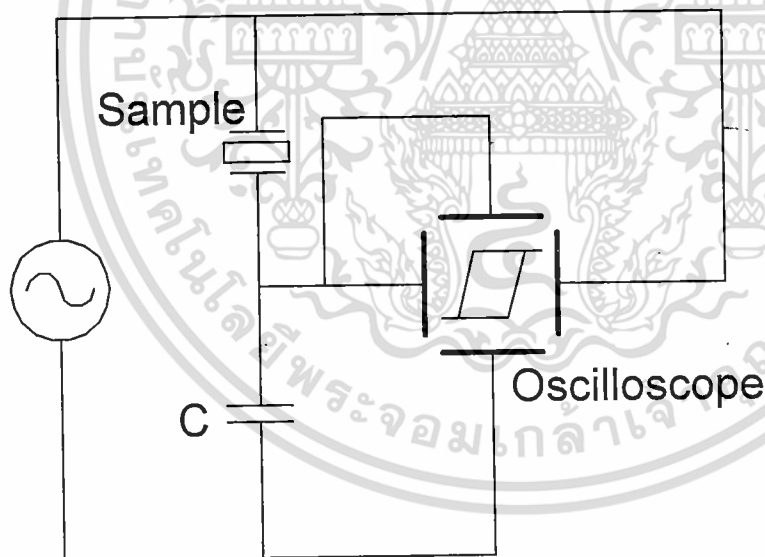
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินการ

ในการดำเนินการวิจัยขั้นแรกได้เริ่มจากการศึกษาเอกสารและบทความจากต่างประเทศ[2,3] เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรสำหรับตรวจวัดอุตสาหกรรมสควิเซอร์เบื้องต้น จากการศึกษาบทความดังกล่าวจึงสรุปวงจรที่ใช้สำหรับชุดวัดคุณสมบัติอุตสาหกรรมสควิเซอร์โดยอาศัยหลักการของ Sawyer และ Tower การดำเนินการขั้นต่อมาคือศึกษาทฤษฎีและคณิตศาสตร์ของวงจร Sawyer-Tower ดังได้แสดงไว้ในบทที่ 2 และทำการออกแบบวงจรดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

3.1 วงจร Sawyer และ Tower แบบพื้นฐาน



รูปที่ 3.1 วงจร Sawyer-Tower แบบพื้นฐาน

วงจร Sawyer และ Tower แบบพื้นฐานแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย วัสดุอุตสาหกรรมเซรามิกหรือวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ต้องการทดสอบ ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและออสซิลโลสโคป จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เราทราบว่าสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัสดุทดสอบจะมีค่าเท่ากับ

$$E = \frac{V}{d}$$

(3.1)

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V) และ

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะทั้งสองหรือความหนาของวัสดุทดสอบ (m)

ดังนั้นเราสามารถวัดแรงดันตกคร่อมวัสดุทดสอบแทนการวัดสนามไฟฟ้าโดยตรงได้ สำหรับวงจร Sawyer-Tower แบบพื้นฐานนั้นจะวัดแรงดันตกคร่อมวัสดุทดสอบโดยทำการวัดที่แกนแนล X ของเครื่องออสซิลโลสโคป

ในการทำงานเดียวกันเนื่องจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกหรือหัววัดอุตสาหกรรมเซรามิกจะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นจากวงจรจึงเห็นเหมือนเป็นตัวเก็บประจุ 2 ตัว มาต่ออนุกรมกันอยู่ โดยตัวเก็บประจุที่นำมาต่อไว้นั้นเพื่อใช้สำหรับวัดค่าโพลาไรเซชันของวัสดุทดสอบ โดยจาก

$$P = D - \epsilon_0 E$$

(3.2)

เมื่อ P คือ ค่าโพลาไรเซชันของวัสดุ

D คือ Electric displacement มีค่าเท่ากับประจุที่สะสมไว้ต่อพื้นที่ (Q/A)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ (8.85×10^{-12} ฟารัด/เมตร)

เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่าน้อยมากๆ ในที่นี้เราจึงตัดทิ้งไป คิดได้ว่า

$$P = D = \frac{Q}{A} \quad (3.3)$$

ดังนั้นการที่เราจะหาค่าโพลาไรเซชัน ได้นั้นเราจำเป็นต้องรู้

- (1) พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ
- (2) ประจุที่สะสมอยู่ในวัสดุทดสอบ

เนื่องจากเราไม่สามารถวัดประจุที่สะสมอยู่ในวัสดุทดสอบได้โดยตรง เราจึงอาศัยหลักการต่ออนุกรมของตัวเก็บประจุที่ว่า “เมื่อต่อตัวเก็บประจุ / ตัวอนุกรมกัน ตัวเก็บประจุทั้งสองจะมีประจุสะสมอยู่เท่ากัน” ดังนั้นการต่อตัวเก็บประจุเอาไว้นั้นก็เพื่อวัดประจุที่สะสมอยู่ในวัสดุทดสอบ โดยที่เรารู้ว่า

$$Q = CV \quad (3.4)$$

เมื่อ Q คือประจุที่สะสมอยู่ในวัสดุนั้นๆ

C คือค่าความเก็บประจุ

V คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุนั้นๆ

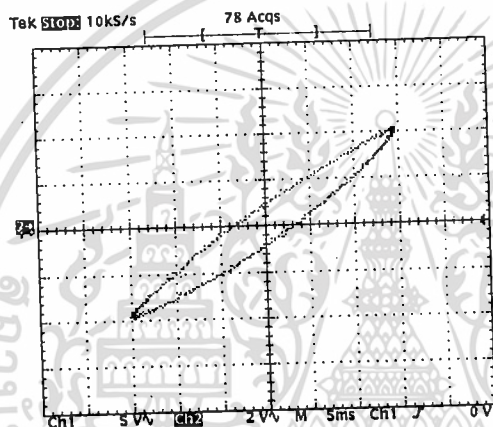
จากสมการ (3.4) การวัดหาโพลาไรเซชันของวัสดุทดสอบสามารถทำได้โดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่รู้ค่าความเก็บประจุ และรู้พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบดังสมการ

$$P = \frac{Q_{\text{sample}}}{A_{\text{sample}}} = \frac{Q_c}{A_{\text{sample}}} = \frac{CV_c}{A_{\text{sample}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการวัดโพลาริเซชันของวัสดุทดสอบในวงจร Sawyer-Tower พื้นฐานจะนำเอาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไปต่อวัดที่แกนแนล Y ของออสซิลโลสโคป

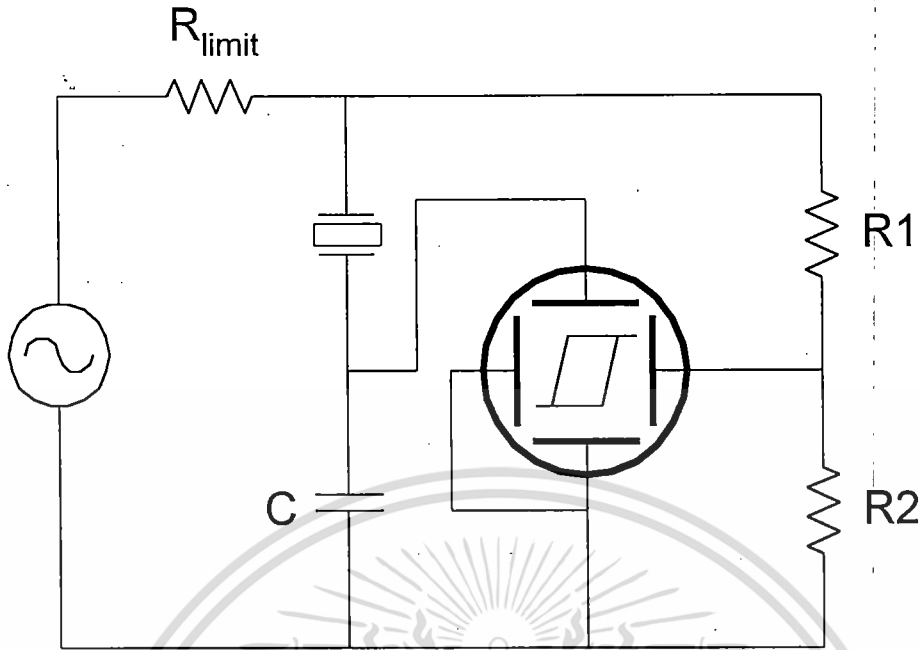
วงจร Sawyer และ Tower พื้นฐานนั้นเมื่อใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ(function generator) ผลปรากฏว่ารูปกราฟฮิสเทอรีซิสที่ได้ยังไม่เป็นฮิสเทอรีซิสเต็มรูป หมายความว่ายังไม่อิมิตัวดังแสดงในรูป 3.2 ซึ่งเราเรียกฮิสเทอรีซิสแบบนี้ว่า “minor loop hysteresis”



รูปที่ 3.2 minor loop

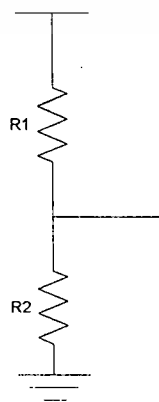
3.2 วงจร Sawyer-Tower ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

ด้วยสาเหตุในหัวข้อ 3.1 ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุที่ทดสอบได้รับสนามไฟฟ้าไม่ถึงจุดที่เกิดการโพลาริเซชันแบบอิมิตัวได้ จึงทำการพัฒนางจร Sawyer และ Tower เพิ่มเติมดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 วงจร Sawyer และ Tower ที่ถูกปรับปรุงขึ้นใหม่

ในขั้นแรกทำการหาแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันสูงมากๆ ในระดับ high voltage เพื่อมาป้อนให้กับวงจร Sawyer และ Tower แบบพื้นฐาน แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงมากในระดับกิโลโวลต์ ($1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$) ซึ่งออสซิลโลสโคปไม่สามารถวัดสัญญาณในระดับเป็นพันโวลต์ได้ ดังนั้นจึงได้เพิ่มเติมส่วนวงจรเพื่อลดแรงดันลงมาให้อยู่ในระดับที่ออสซิลโลสโคปสามารถวัดได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของออสซิลโลสโคปแต่ลักษณะที่สามารถวัดได้สูงสุดในย่านใด โดยอาศัยวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ดังรูป 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูป 3.4 วงจรแบ่งแรงดันเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสมการต่อไปนี

$$V_{HV} = I(R_1 + R_2) \quad (3.6)$$

$$I = \frac{V_{HV}}{R_1 + R_2} \quad (3.7)$$

$$V_x = IR_2 \quad (3.8)$$

$$V_x = \frac{V_{HV} R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.9)$$

เมื่อ V_x คือ แรงดันที่ต่อเข้ากับแขนแนล X ของออสซิลโลสโคป

V_{HV} คือ แรงดันตกคร่อมวัสดุทดสอบ

R_1, R_2 คือ ตัวต้านทานทนกำลังสูง

จากสมการ (3.9) เมื่อเรารู้ว่าออสซิลโลสโคปที่เราใช้สามารถรับแรงดันสูงสุดได้ในย่านใด(เราจะกำหนดให้เป็น V_x) เราก็สามารถเลือกค่า R_1 และ R_2 ที่เหมาะสมได้

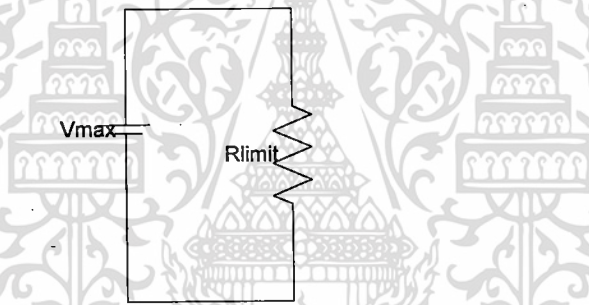
แต่จุดที่ต้องการพิจารณาเพิ่มเติมได้แก่ อัตราทนกำลังหรือความร้อนของตัวต้านทานที่จะเกิดขึ้นขณะที่ชุดเครื่องมือที่เราออกแบบไว้ทำงาน ซึ่งพิจารณาได้จาก

$$\begin{aligned} P &= IV_x \\ &= I^2 R \\ &= \frac{V_x^2}{R} \end{aligned} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเรารู้ค่ากระแสไฟฟ้า(I) สูงสุดหรือแรงดัน V_x สูงสุดแล้วและรู้ค่าของตัวต้านทานที่นำมาใช้เราก็จะสามารถคำนวณหากำลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่เครื่องมือทำงานได้ ดังนั้นเราจึงควรเลือกตัวต้านทานที่ทนกำลังได้มากกว่ากำลังที่ถูกใช้งานอย่างน้อย 2 เท่า

ส่วนที่พัฒนาขึ้นในจุดต่อไปคือตัวต้านทานจำกัดกระแสหรือ R_{limit} ซึ่งเนื่องจากเมื่อตัวเก็บประจุไม่มีประจุเก็บไว้ภายในตัวมันเลย เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแล้วจะเสมือนว่าเกิดการลัดวงจรในช่วงเวลาหนึ่ง(ช่วงเวลาทรานเซียนท์) ด้วยเหตุที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นมาจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากๆ ดังนั้นการลัดวงจรเพียงช่วงเวลาหนึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายได้ จึงได้ออกแบบให้มีส่วนป้องกันการลัดวงจรไว้โดยใส่ตัวต้านทานจำกัดกระแสดังในรูป 3.3 ซึ่งค่าของตัวต้านทานจำกัดกระแส นั้นเราจะคิดจากแรงดันสูงสุด(V_{max}) ต่ออยู่กับตัวต้านทานจำกัดกระแสดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณหาค่าความต้านทานจำกัดกระแสและอัตราทนกำลัง

พิจารณาสมการต่อไปนี

$$V_{max} = IR_{limit}$$

$$P = \frac{V_{max}^2}{R_{limit}}$$

(3.11)

เราจะใช้สมการ (3.11) ในการพิจารณา เลือกใช้ตัวต้านทานจำกัดกระแสโดยจากวงจรใน

รูปที่ 3.5 จะเห็นว่าถ้าค่าตัวต้านทานจำกัดกระแสมีค่าน้อยก็จะส่งผลให้มีกระแสไหลเข้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

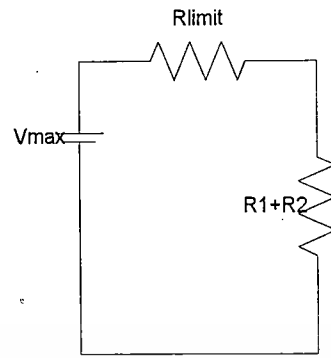
เราจะใช้สมการ (3.11) ในการพิจารณา เลือกใช้ตัวต้านทานจำกัดกระแส โดยจากวงจร
 ในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าถ้าค่าตัวต้านทานจำกัดกระแสมีค่าน้อยก็จะส่งผลให้มีกระแสไหล
 เข้ามาในวงจรมาก ซึ่งจะต้องใช้ตัวต้านทานที่ทนกำลังได้มากๆด้วย แต่ถ้าใช้ตัวต้านทาน
 จำกัดกระแสค่ามากๆจะพบว่าแรงดันส่วนใหญ่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
 จะไปตกคร่อมที่ตัวต้านทานจำกัดกระแส ดังนั้นแรงดันที่ไปตกคร่อมวัสดุทดสอบหรือ
 หัววัดอูลตราโซนิกก็จะน้อยด้วยทำให้สนามโพลาริเซชันที่ไปตกคร่อมวัสดุทดสอบไม่
 ถึงจุดอิ่มตัวได้เป็น minor loop hysteresis อีก ดังนั้นในการพิจารณาเลือกตัวต้านทาน
 จำกัดกระแส นอกจากจะใช้วงจรในรูปที่ 3.5 ในการช่วยพิจารณาแล้ว ยังใช้วงจรที่ 3.6
 อีกด้วย เพื่อดูผลของแรงดันที่ไปตกคร่อมวัสดุทดสอบ พิจารณาตามสมการ

$$V_{\max} = I(R_{\text{limit}} + R_1 + R_2) \quad (3.12)$$

$$I = \frac{V_{\max}}{R_{\text{limit}} + R_1 + R_2} \quad (3.13)$$

$$V_{\text{sample}} = I(R_1 + R_2) \quad (3.14)$$

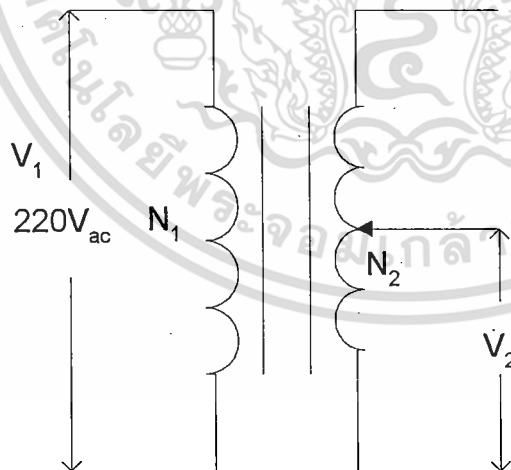
$$V_{\text{sample}} = \frac{V_{\max} (R_1 + R_2)}{R_{\text{limit}} + R_1 + R_2} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณหาค่า
ของความต้านทานจำกัดกระแสอย่างละเอียด

จากสมการ (3.15) จะทำให้เราทราบผลของความต้านทานจำกัดกระแสต่อแรงดันที่มากคร่อมวัสดุทดสอบได้

สุดท้ายเพื่อที่จะทำให้ชุดวัดอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์สามารถเลือกช่วงแรงดันไฟฟ้าที่จะป้อนให้กับวัสดุทดสอบได้ เราจึงอาศัยตัวปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (vary-ac = variac) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Variac

หลักการของ variac เป็นไปดังสมการ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.16)$$

เมื่อ V_1 คือ แรงดันไฟปฐมภูมิหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของบ้านทั่วไป

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ออกจากตัว variac (ด้านทุติยภูมิ)

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิซึ่งถูกจำกัดไว้ให้มีค่าคงที่และ

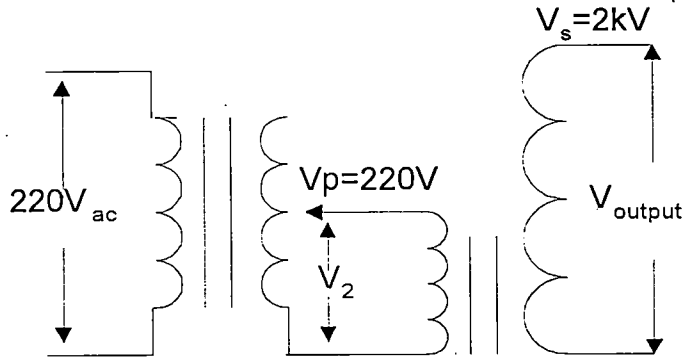
N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิซึ่งปรับเลือกได้

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจะได้ตามสมการ

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} (220V) \quad (3.17)$$

กล่าวคือเมื่อมีการหมุนปรับจำนวนรอบของขดลวดของ variac ด้านทุติยภูมิก็จะส่งผลให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับออกมาที่ค่าต่างๆกันขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด

แต่เนื่องจาก variac ไม่สามารถปรับแรงดันให้มีค่าสูงเป็นพันโวลต์ได้ ดังนั้นจึงต้องออกแบบระบบให้มีมือแปลงสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเรียกว่า step-up transformer ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การต่อ variac กับ step-up transformer

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.8 แรงดันเอาต์พุตที่ออกมาจากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกแบบไว้จะคำนวณได้จาก

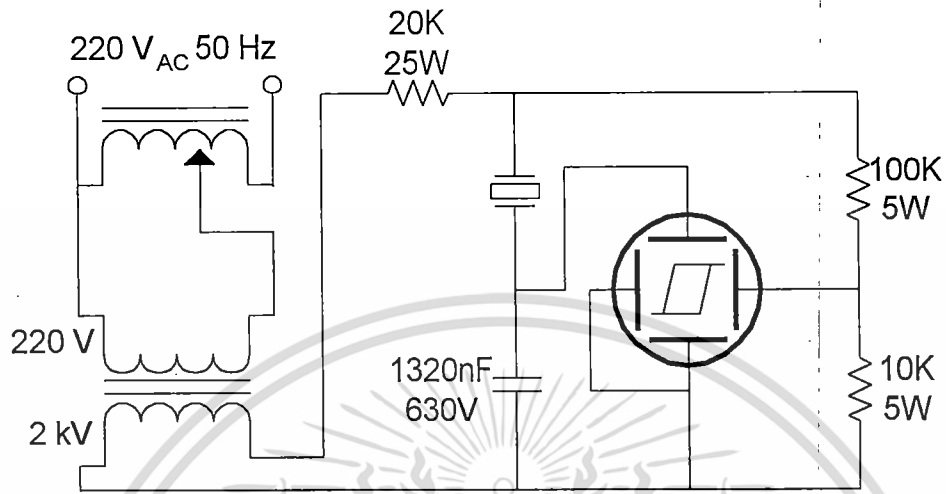
$$V_{output} = \frac{\text{แรงดันด้านทุติยภูมิของ step-up transformer}}{\text{แรงดันด้านปฐมภูมิของ step-up transformer}} \times V_2 \quad (3.18)$$

หรือ

$$V_{out} = \frac{2kV}{220V} \times V_2 \quad (3.19)$$

รูปวงจรที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้

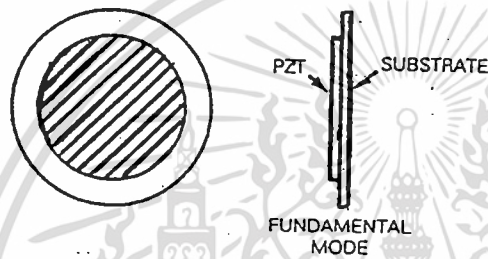
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานและนำผลดังกล่าวมาวิเคราะห์ ในส่วนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผล P-E Hysteresis Loop ที่ได้จากสารเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิดด้วยกันคือ

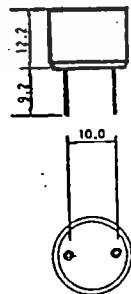
1. แบเรียมทิตานต (BaTiO₃)



รูปที่ 4.1 ลักษณะสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดแบเรียมทิตานต

2. อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer)

T 40-16 & R 40-16



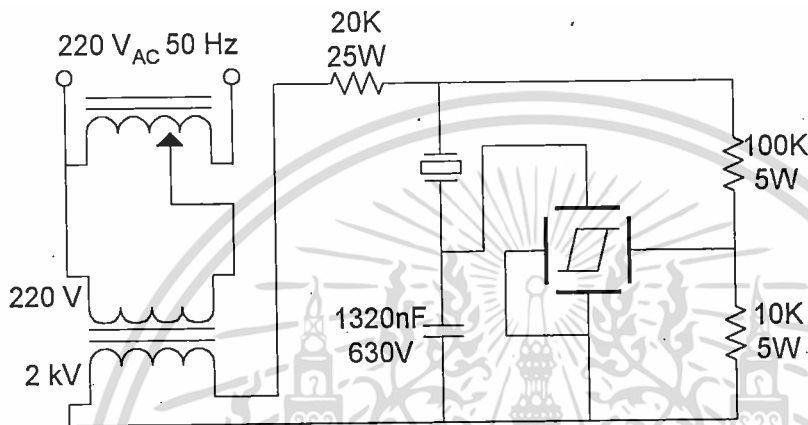
รูป 4.2 ลักษณะอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 วิธีการทดลอง

4.1.1 แบบเรียงมิเรียงตาเนต(BaTiO₃)

1. ต่อดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรที่ใช้สำหรับการทดลอง

หมายเหตุ: ตัวต้านทานที่ใช้ในการทดลองควรทนกำลังได้สูงๆ และตัวเก็บประจุก็ต้องทนแรงดันได้สูงๆเช่นกัน และเนื่องจากทำงานที่ระดับแรงดันประมาณสองพันโวลท์ จึงควรระมัดระวังในการทำการทดลองด้วย

2. นำสายออกสติกโลสโคปที่ใช้วัดแรงดันแกน x จับสัญญาณคร่อมที่ตัวต้านทาน R_2 ($R = 10k\Omega$) กับ ground และนำสายที่ใช้วัดแรงดันในแกน y จับสัญญาณคร่อมที่ตัวเก็บประจุ C ($C = 1320 \text{ nF}$) กับ ground

3. ปรับแรงดันด้วยวารีแอกจนค่าแรงดัน V มีค่าสูงแต่ไม่เกินแรงดัน breakdown ของวัสดุที่ใช้ทดลอง $V = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_x < V_{breakdown}$ (แรงดัน breakdown เป็นค่าแรงดันที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปไปแล้วไม่สามารถกลับมาสู่สภาวะเดิมได้โดยทั่วไปนิยมเขียนเป็นเทอมใหม่ว่าค่า dielectric strength) ในที่นี้กำหนดให้ปรับวารีแอกจนมีแรงดัน V_x เท่ากับ 50 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากนั้นเปลี่ยนโหมดของออสซิลโลสโคปไปที่การวัดสัญญาณในโหมด xy
5. สังเกตกราฟฮิสเทอรีซิสที่เกิดขึ้นโดยพิมพ์รูปกราฟออกมาทางเครื่องพิมพ์ แล้วบันทึกผลค่าแรงดันที่จุด P_r , E_c , P_s และ E_r ตามลำดับ
6. นำมาคำนวณหาค่า P_r, E_c, P_s และ E_r จากสมการที่ (2.31), (2.36) และ (2.42)
7. ปรับแรงดันด้วยวารีแอกให้กลับเป็นศูนย์ใหม่อีกครั้ง
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3-7 ใหม่จนครบ 5 ครั้งแล้วนำผลที่วัดได้มาวิเคราะห์
9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3-8 ใหม่โดยเปลี่ยนวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลองใหม่อีก 3 ตัวอย่าง
10. สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1.2 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์(Ultrasonic transducer)

ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีทดสอบสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดแบเรียมทิตาเนต

4.2 ผลการวิจัย

จากการทดลองวัดผล P-E Hysteresis Loop ของสารเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิดได้ผลดังนี้

4.2.1 แบเรียมทิตาเนต($BaTiO_3$)

วัตถุทดสอบตัวที่ 1

ความหนาของวัสดุ

2.56E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.211E-04 ตารางเมตร

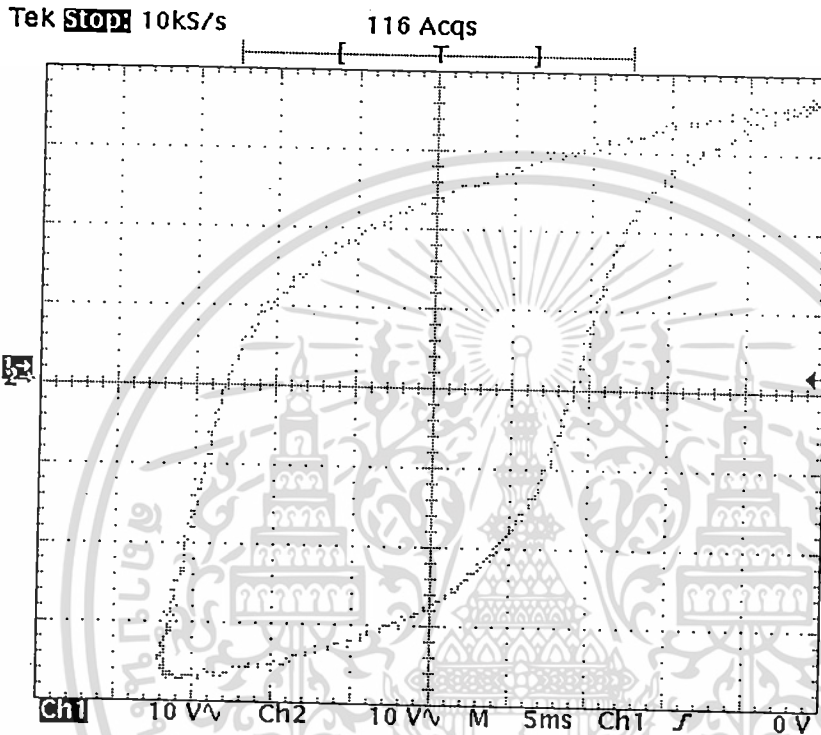
วัดครั้งที่	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลต์)					
	ค่าโพลาริซิงคั้ง		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง		ค่าโพลาริซิมค้ว	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ซิกบวก	ซิกลบ	ซิกบวก	ซิกลบ	ซิกบวก	
1	24.0	27.2	18.0	26.0	27.2	0.933
2	24.8	27.6	18.0	25.6	28.0	0.956
3	24.0	27.6	18.0	26.4	27.6	0.903
4	23.6	28.0	17.6	26.8	28.0	0.933
5	24.8	28.0	18.4	26.8	31.6	0.933
ค่าเฉลี่ย	24.2	27.7	18.0	26.3	28.5	0.932
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4800	0.2993	0.2530	0.4665	1.5880	0.0169
ค่าความไม่แน่นอน	1.4400	0.8980	0.7589	1.3994	4.7639	0.0507

วัดครั้งที่	ค่าจริงที่ได้จากการแปลงไปในสมการ					
	ค่าโพลาริซิงคั้ง (C/คร.ม.)		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (V/m)		ค่าโพลาริซิมค้ว (C/คร.ม.)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ซิกบวก	ซิกลบ	ซิกบวก	ซิกลบ	ซิกบวก	
1	0.099	0.112	773437.5	1117187.5	0.112	10089.611
2	0.102	0.113	773437.5	1100000.0	0.115	10333.372
3	0.099	0.113	773437.5	1134375.0	0.113	9759.296
4	0.097	0.115	756250.0	1151562.5	0.115	10089.611
5	0.102	0.115	790625.0	1151562.5	0.130	10089.611
ค่าเฉลี่ย	0.100	0.114	773437.5	1130937.5	0.117	10072.300
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0020	0.0012	10870.3295	20043.8971	0.0065	182.7726
ค่าความไม่แน่นอน	0.0059	0.0037	32610.9884	60131.6914	0.0196	548.3179

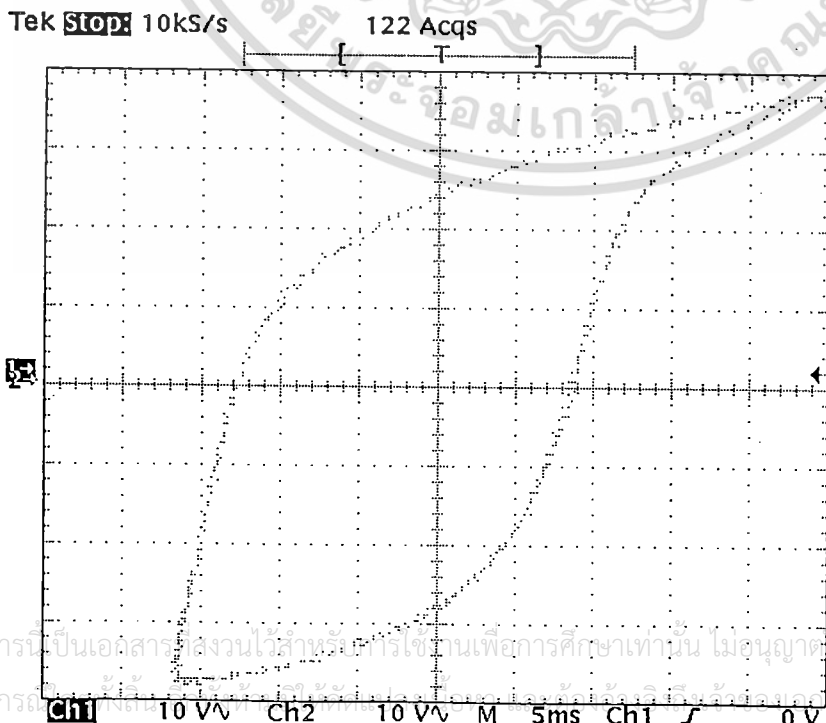
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 1

วัดครั้งที่ 1

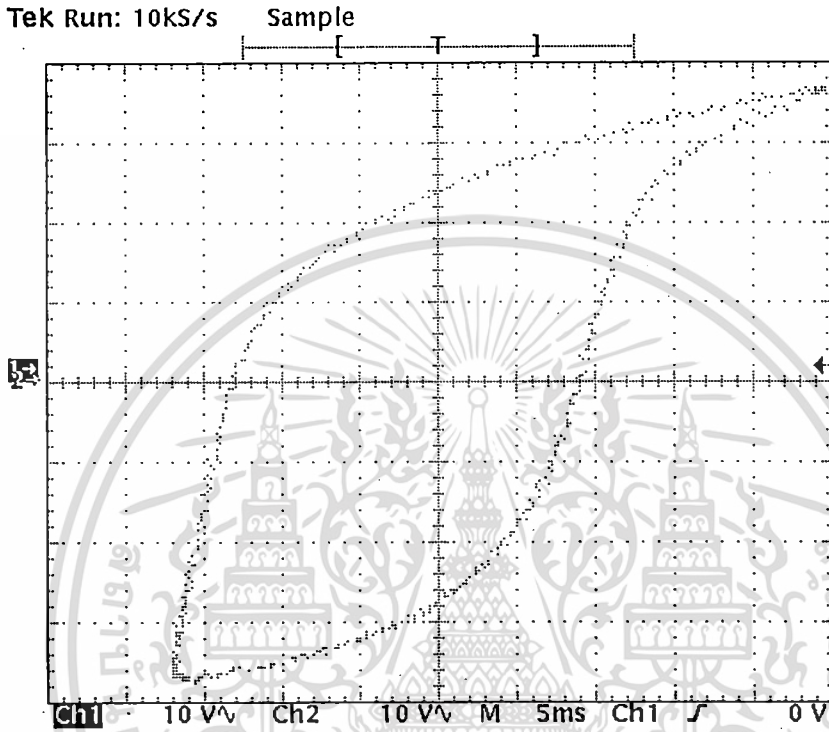


วัดครั้งที่ 2

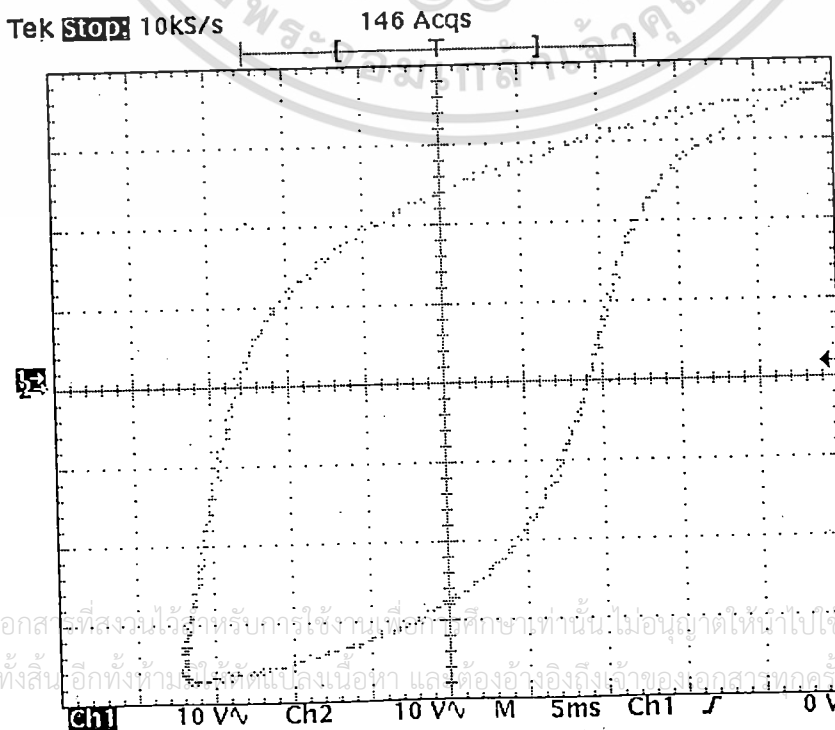


ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 1

วัดครั้งที่ 3



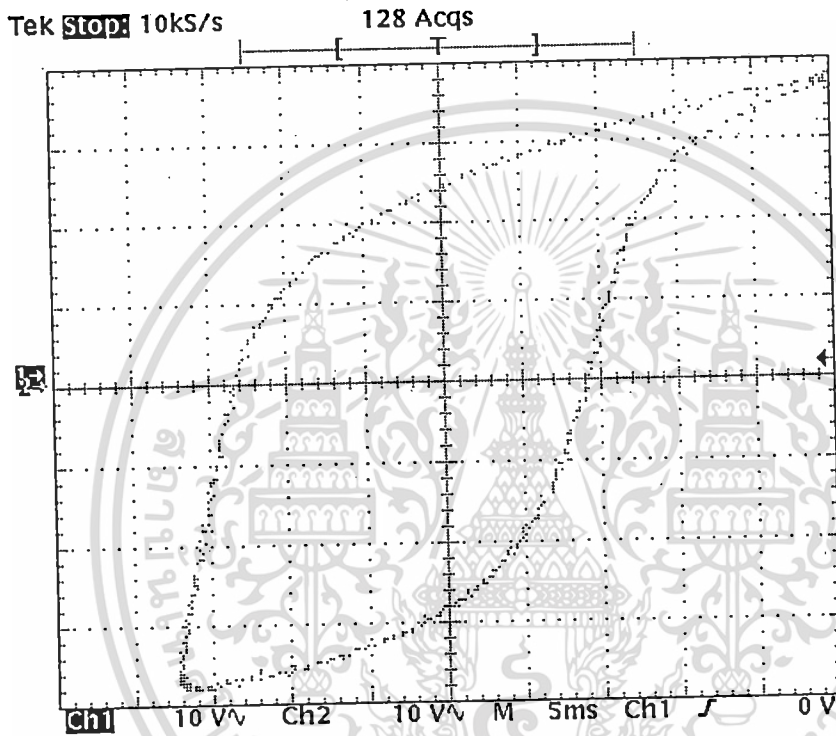
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ทั้งแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอริซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 1

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุทดสอบตัวที่ 2

ความหนาของวัสดุ

2.48E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.230E-04 ตารางเมตร

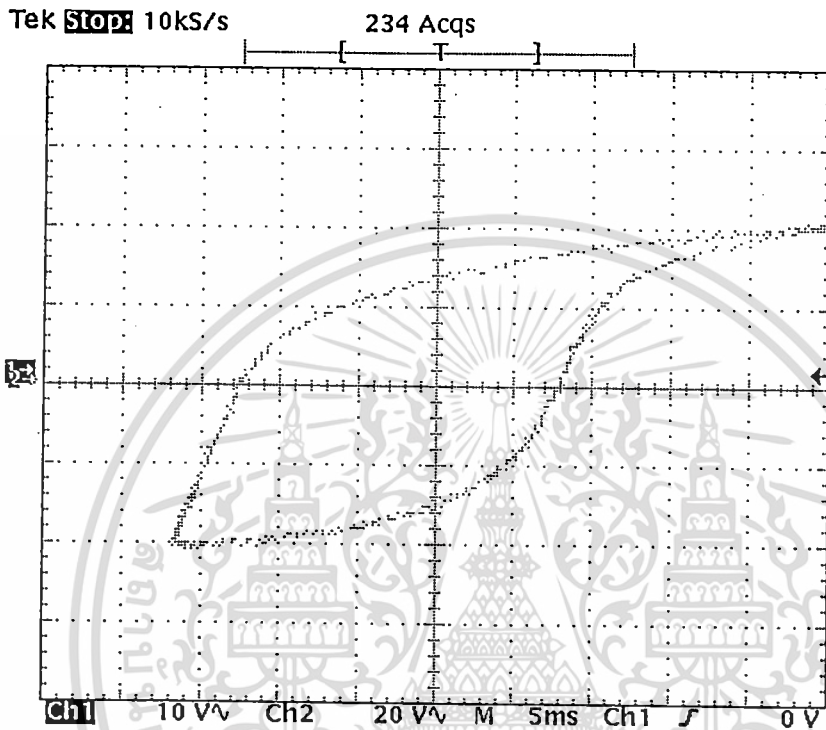
วัดครั้งที่	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลต์)					ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ค่าโวลตาไรซ์กึ่งค้าง		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง		ค่าโวลตาไรซ์อ้อมตัว	
	ซีกบวก	ซีกลบ	ซีกบวก	ซีกลบ		
1	27.2	30.4	16.0	25.6	34.4	1.118
2	27.2	30.4	16.0	24.8	33.6	1.130
3	29.6	32.0	14.8	24.0	36.8	1.206
4	28.0	30.4	15.2	24.8	36.0	1.156
5	32.0	34.4	12.0	24.0	37.6	1.439
ค่าเฉลี่ย	28.8	31.5	14.8	24.6	35.7	1.210
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.8243	1.5677	1.4751	0.5987	1.4838	0.1183
ค่าความไม่แน่นอน	5.4728	4.7030	4.4254	1.7960	4.4513	0.3550

วัดครั้งที่	ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ					ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ค่าโวลตาไรซ์กึ่งค้าง (C/ตร.ม.)		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (V/m)		ค่าโวลตาไรซ์อ้อมตัว (C/ตร.ม.)	
	ซีกบวก	ซีกลบ	ซีกบวก	ซีกลบ		
1	0.111	0.124	709677.4	1135483.9	0.141	11635.681
2	0.111	0.124	709677.4	1100000.0	0.137	11768.813
3	0.121	0.131	656451.6	1064516.1	0.150	12559.148
4	0.114	0.124	674193.5	1100000.0	0.147	12037.571
5	0.131	0.141	532258.1	1064516.1	0.154	14977.045
ค่าเฉลี่ย	0.118	0.129	656451.6	1092903.2	0.146	12595.652
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0075	0.0064	65429.0252	26553.6976	0.0061	1231.9924
ค่าความไม่แน่นอน	0.0224	0.0192	196287.0755	79661.0928	0.0182	3695.9771

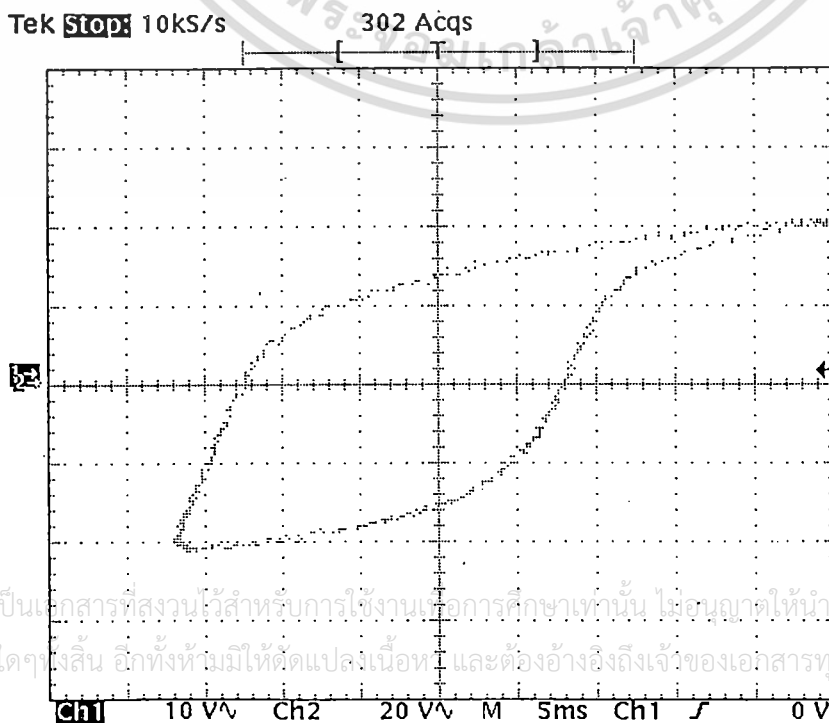
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอริซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 2

วัดครั้งที่ 1



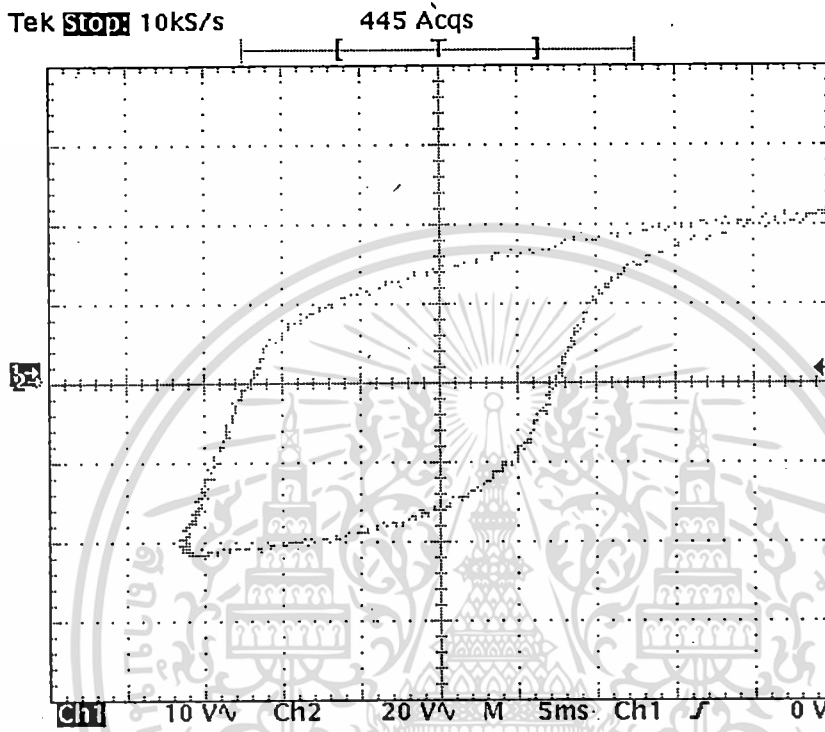
วัดครั้งที่ 2



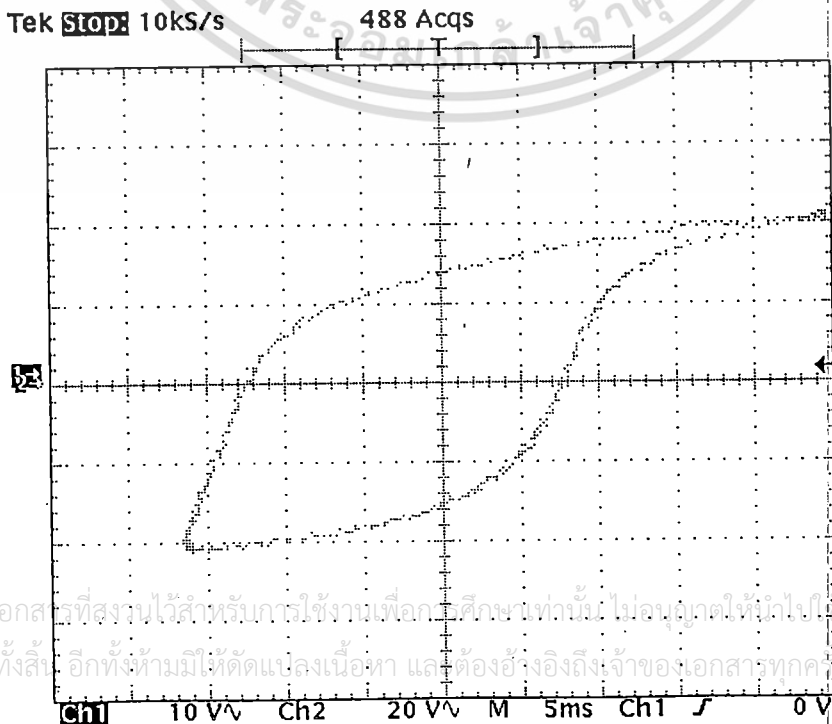
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 2

วัดครั้งที่ 3



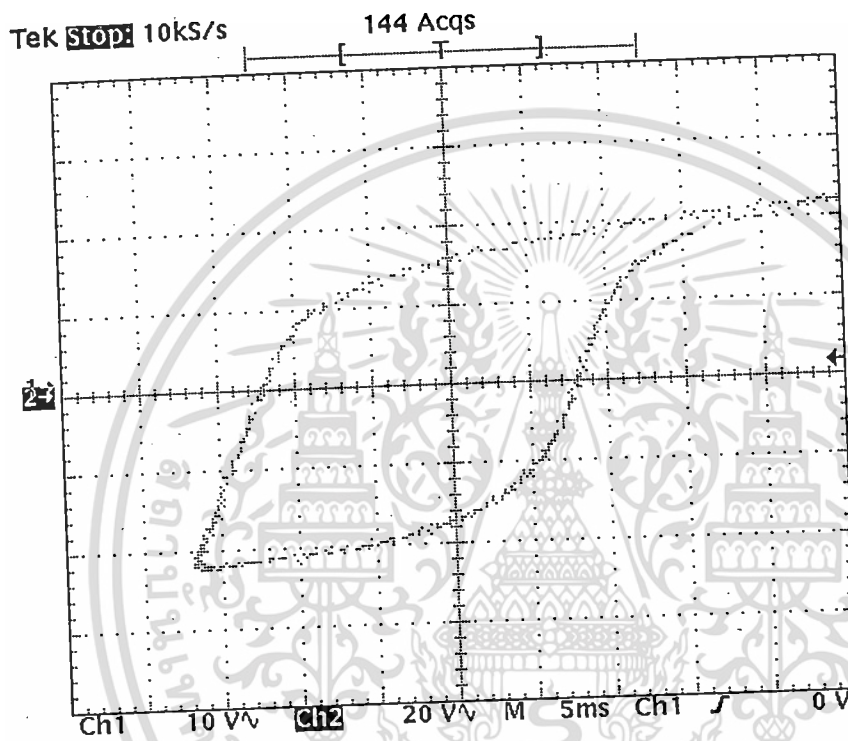
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไป ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 2

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ

2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.269E-04 ตารางเมตร

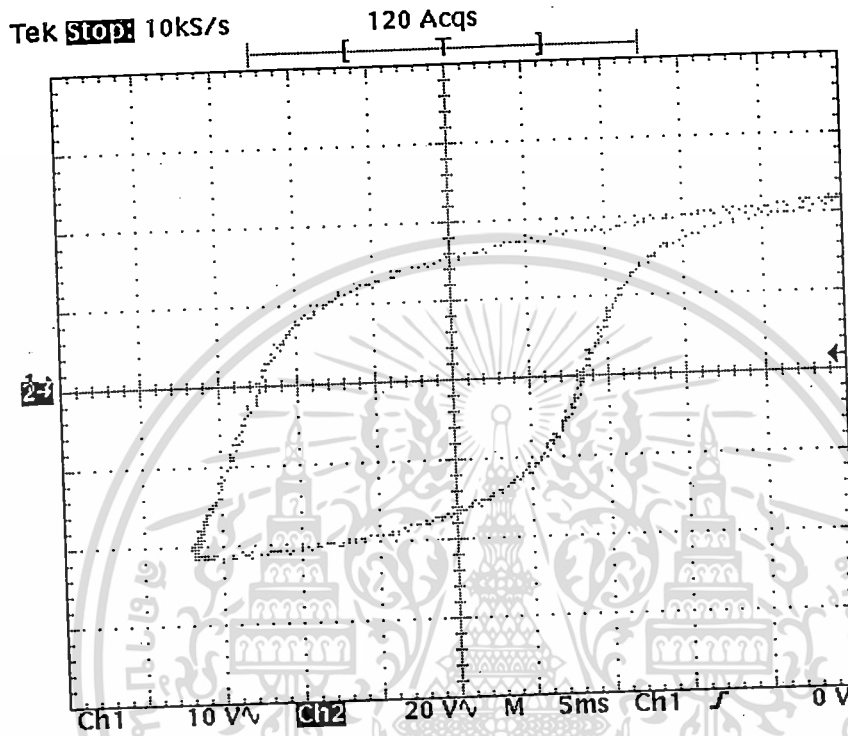
วัดครั้งที่	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลต์)					ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ค่าโพลาริซิงก์ข้าง		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง		ค่าโพลาริซิมตัว	
	ซีกบวก	ซีกลบ	ซีกบวก	ซีกลบ		
1	31.2	33.6	16.4	24.8	36.0	1.171
2	32.0	34.4	16.4	24.4	38.4	1.194
3	31.2	34.4	16.8	25.2	37.6	1.167
4	31.2	34.4	17.2	24.8	38.4	1.156
5	28.8	32.8	14.0	23.2	34.4	1.267
ค่าเฉลี่ย	30.9	33.9	16.2	24.5	37.0	1.191
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.0852	0.6400	1.1200	0.6882	1.5513	0.0398
ค่าความไม่แน่นอน	3.2555	1.9200	3.3600	2.0646	4.6538	0.1194

วัดครั้งที่	ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ					ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ค่าโพลาริซิงก์ข้าง (C/ตร.ม.)		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (V/m)		ค่าโพลาริซิมตัว (C/ตร.ม.)	
	ซีกบวก	ซีกลบ	ซีกบวก	ซีกลบ		
1	0.126	0.136	733333.3	1108943.1	0.145	11952.919
2	0.129	0.139	733333.3	1091056.9	0.155	12187.766
3	0.126	0.139	751219.5	1126829.3	0.152	11904.330
4	0.126	0.139	769105.7	1108943.1	0.155	11798.041
5	0.116	0.132	626016.3	1037398.4	0.139	12924.701
ค่าเฉลี่ย	0.125	0.137	722601.6	1094634.1	0.149	12153.551
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0044	0.0026	50081.3008	30772.5457	0.0063	406.1021
ค่าความไม่แน่นอน	0.0131	0.0078	150243.9024	92317.6370	0.0188	1218.3063

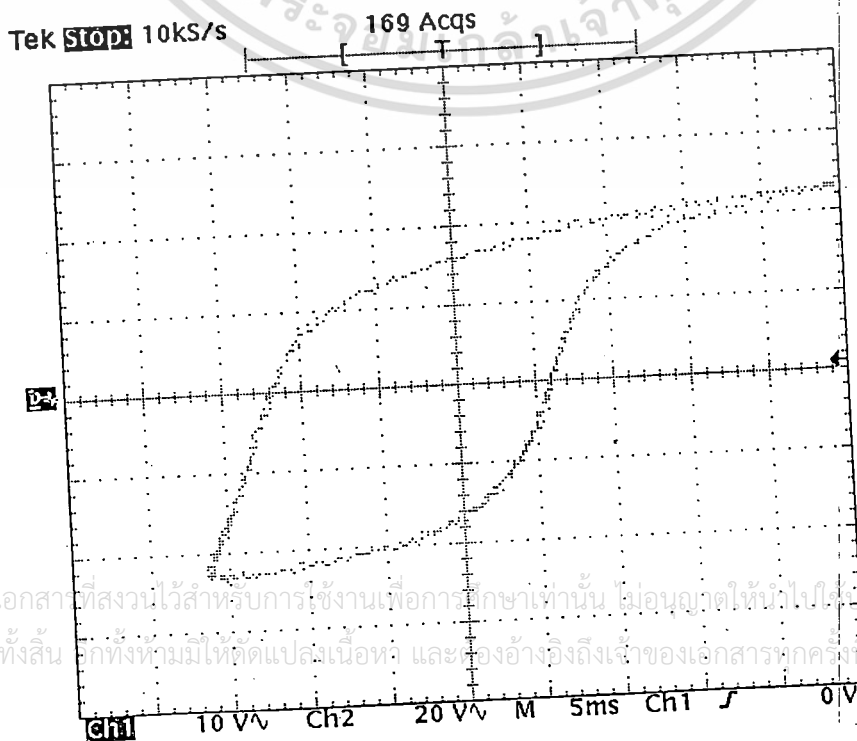
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอริซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 3

วัดครั้งที่ 1



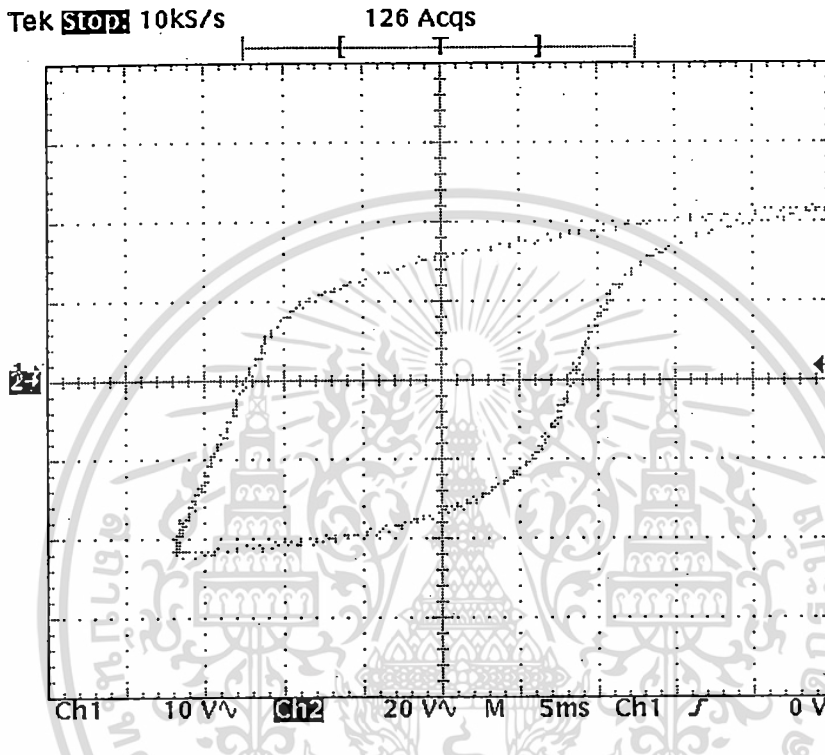
วัดครั้งที่ 2



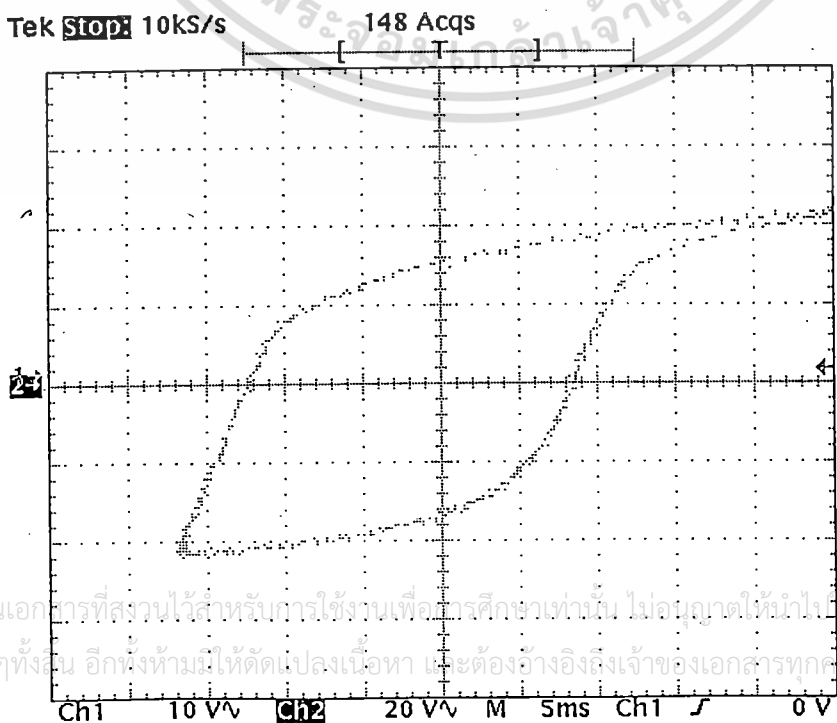
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 3

วัดครั้งที่ 3



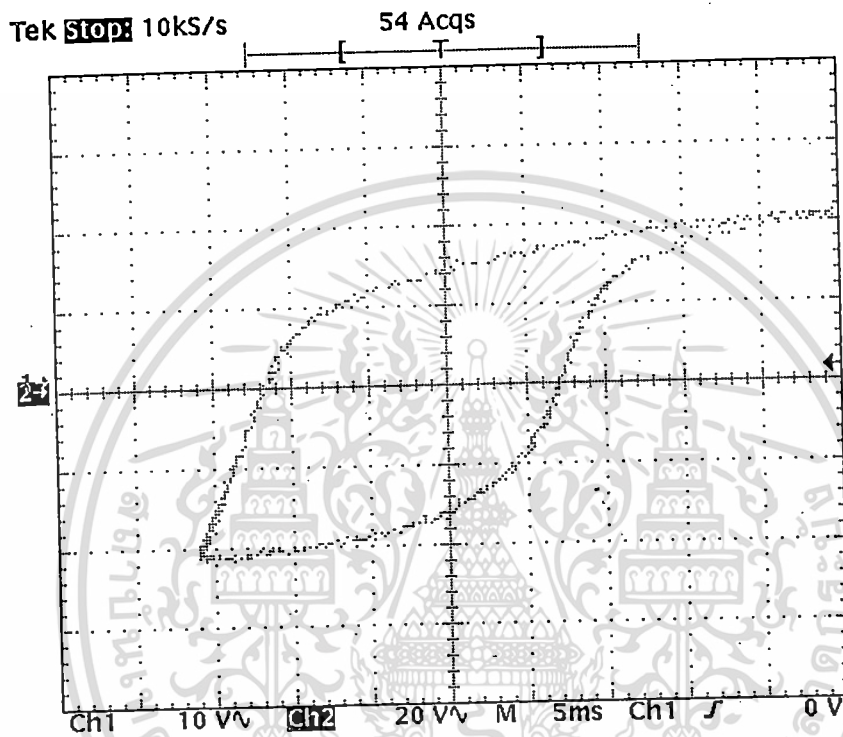
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 3

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4

ความหนาของวัสดุ

2.33E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.224E-04 ตารางเมตร

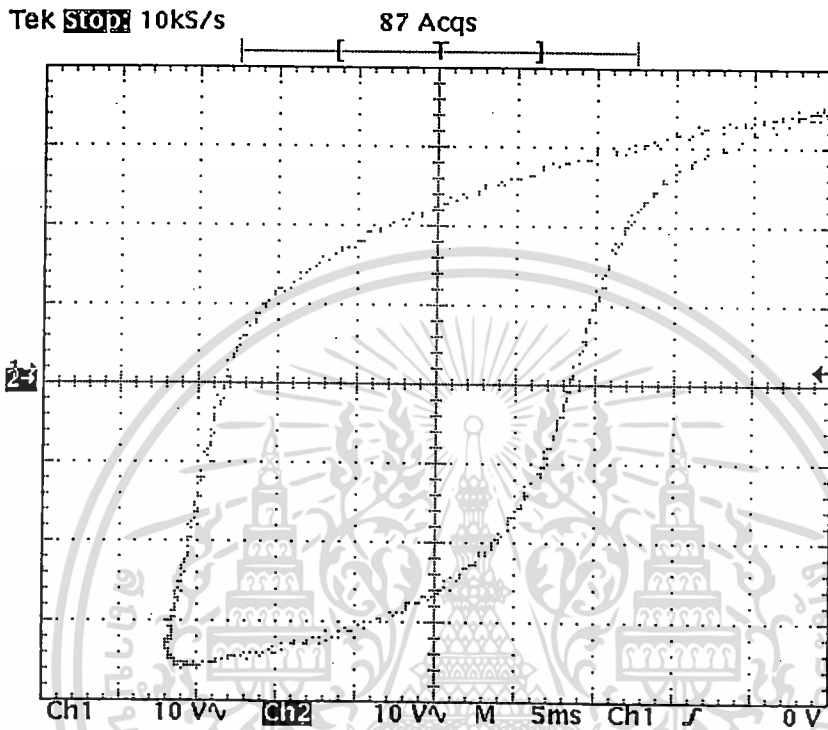
วัดครั้งที่	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลท์)					ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ค่าโพลาริซังก้าง		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง		ค่าโพลาริซอมตัว	
	ซีกบวก	ซีกลบ	ซีกบวก	ซีกลบ		
1	22.4	26.4	16.8	26.4	29.2	0.912
2	22.4	26.8	16.8	26.8	28.0	0.925
3	22.8	26.0	16.8	27.2	26.8	0.970
4	23.2	26.8	16.8	26.8	26.8	0.926
5	21.2	25.2	17.6	26.8	25.6	0.849
ค่าเฉลี่ย	22.4	26.2	17.0	26.8	27.3	0.917
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.6693	0.5987	0.3200	0.2530	1.2238	0.0388
ค่าความไม่แน่นอน	2.0080	1.7960	0.9600	0.7589	3.6713	0.1165

วัดครั้งที่	ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ					ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
	ค่าโพลาริซังก้าง (C/ตร.ม.)		ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (V/m)		ค่าโพลาริซอมตัว (C/ตร.ม.)	
	ซีกบวก	ซีกลบ	ซีกบวก	ซีกลบ		
1	0.092	0.108	793133.0	1246351.9	0.120	8934.734
2	0.092	0.110	793133.0	1265236.1	0.115	9068.089
3	0.093	0.106	793133.0	1284120.2	0.110	9502.435
4	0.095	0.110	793133.0	1265236.1	0.110	9078.843
5	0.087	0.103	830901.3	1265236.1	0.105	8322.766
ค่าเฉลี่ย	0.092	0.107	800686.7	1265236.1	0.112	8981.373
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0027	0.0025	15107.2961	11943.3663	0.0050	380.6478
ค่าความไม่แน่นอน	0.0082	0.0074	45321.8884	35830.0988	0.0150	1141.9433

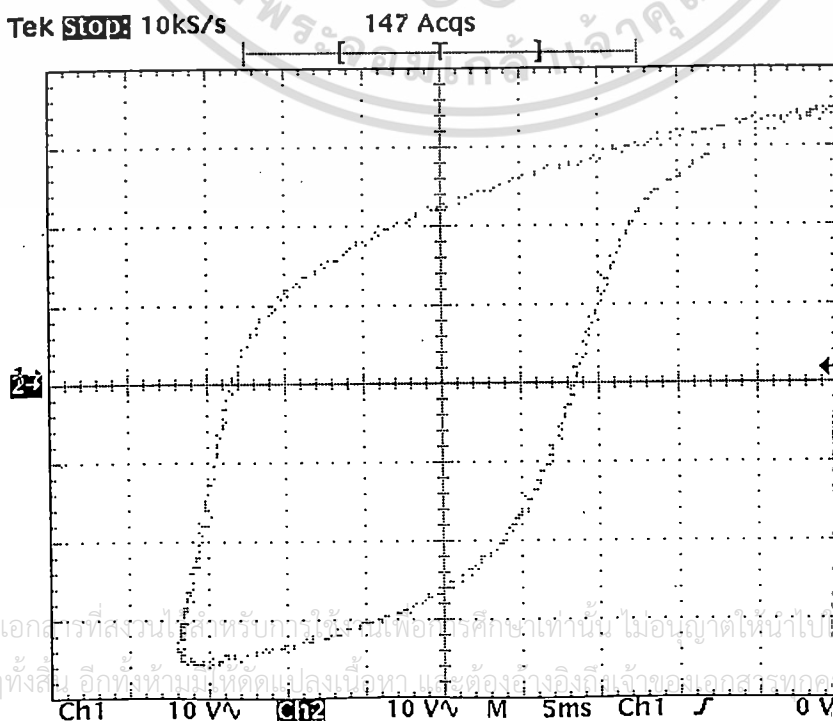
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 4

วัดครั้งที่ 1



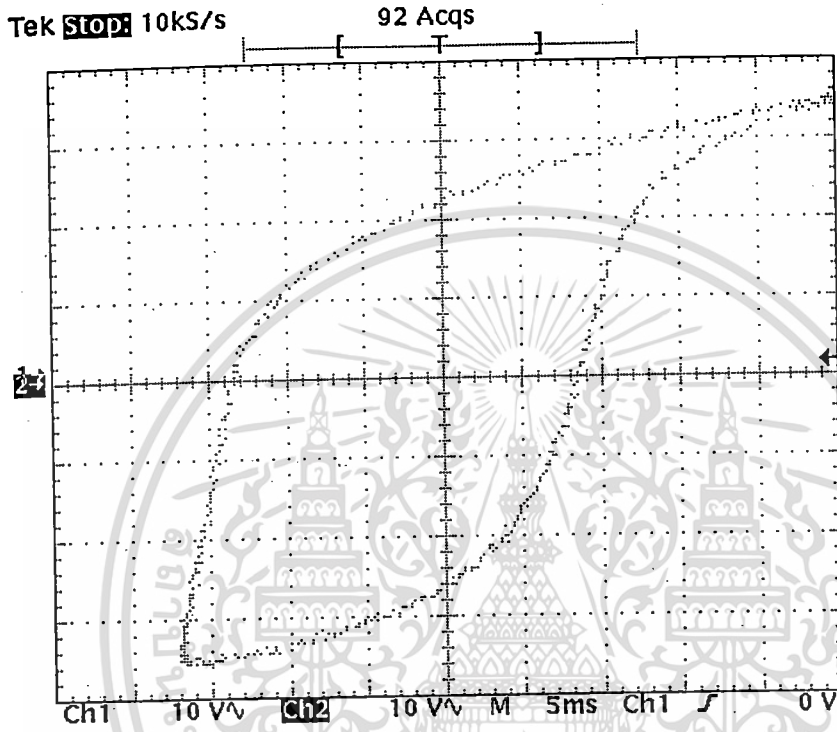
วัดครั้งที่ 2



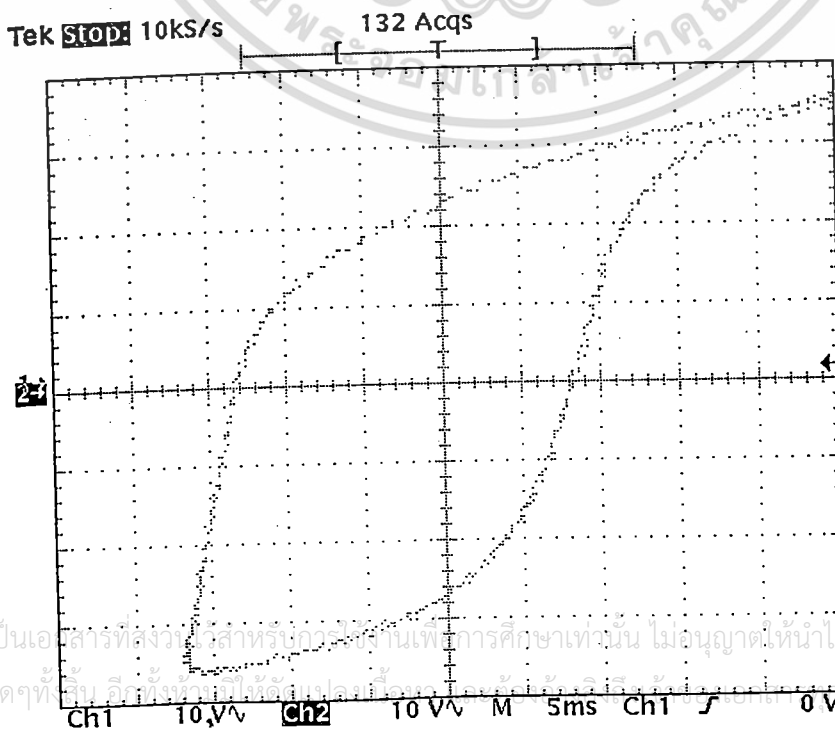
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำคัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 4

วัดครั้งที่ 3



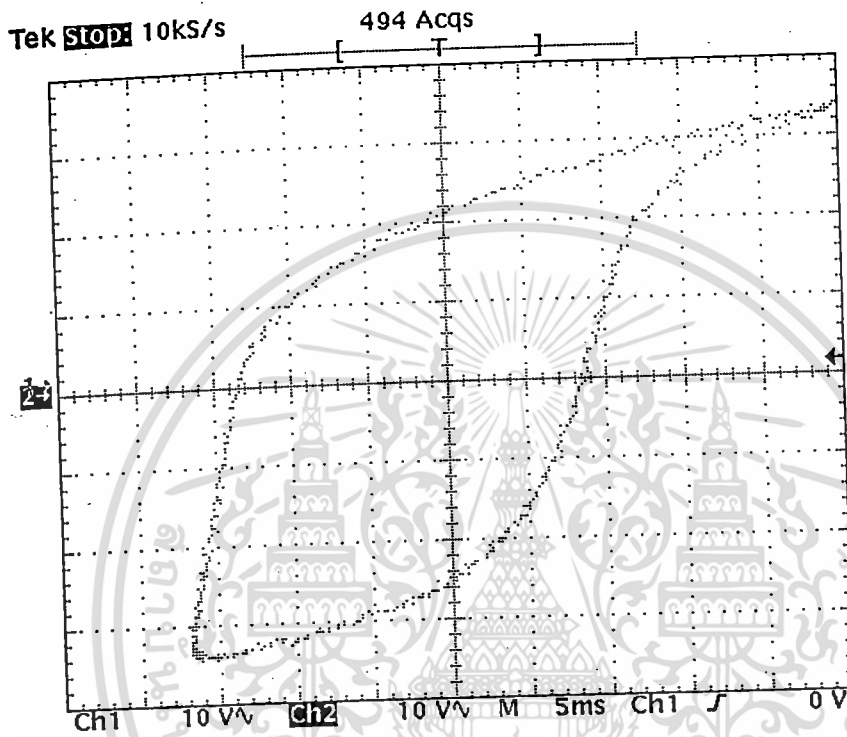
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิพนธ์ซึ่งจะมีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอริซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 4

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์(Ultrasonic transducer)

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)

ความหนาของวัสดุ 8.43E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 1.940E-03 ตารางเมตร

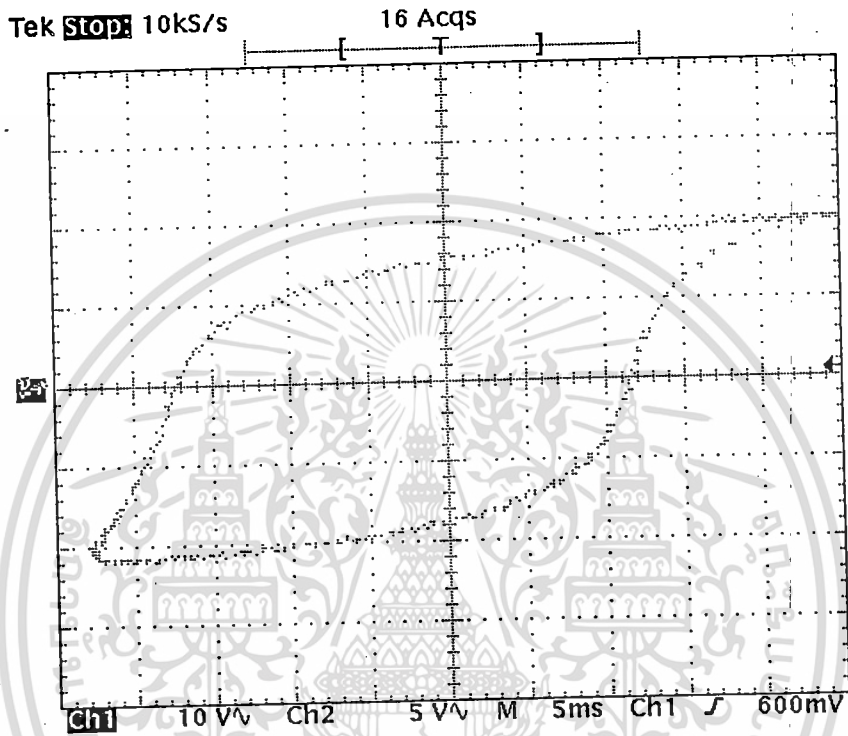
วัตถุครั้งที่	สัมประสิทธิ์ไฟฟ้าที่ความถี่ 100 kHz					
	ค่าโพตเตนเชียลคงที่		ค่าสัมประสิทธิ์เฟส		ค่าโพตเตนเชียลรวม	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	จลนบวก	จลลบ	จลนบวก	จลลบ	จลนบวก	สัมพัทธ์สูงสุด
1	7.9	8.8	23.0	34.0	10.0	0.229
2	7.3	8.2	24.0	35.0	8.9	0.198
3	7.0	8.2	23.0	34.2	9.3	0.206
4	7.5	8.4	23.0	34.2	10.0	0.212
5	7.5	8.5	23.4	34.2	9.5	0.203
ค่าเฉลี่ย	7.4	8.4	23.3	34.3	9.5	0.210
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2939	0.2227	0.3919	0.3487	0.4224	0.0105
ค่าความไม่แน่นอน	0.8818	0.6681	1.1758	1.0461	1.2671	0.0316

วัตถุครั้งที่	ค่าแรงที่ได้ออกมาที่ความถี่ 100 kHz					
	ค่าโพตเตนเชียลคงที่ (C ₁₂)		ค่าสัมประสิทธิ์เฟส (V/m)		ค่าโพตเตนเชียลรวม (C ₁₂)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	จลนบวก	จลลบ	จลนบวก	จลลบ	จลนบวก	สัมพัทธ์สูงสุด
1	0.005	0.006	300118.6	443653.6	0.007	1346.746
2	0.005	0.006	313167.3	456702.3	0.006	1167.944
3	0.005	0.006	300118.6	446263.3	0.006	1214.112
4	0.005	0.006	300118.6	446263.3	0.007	1249.821
5	0.005	0.006	305338.1	446263.3	0.006	1195.481
ค่าเฉลี่ย	0.005	0.006	303772.2	447829.2	0.006	1234.821
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0002	0.0002	5113.9999	4550.2148	0.0003	61.9698
ค่าความไม่แน่นอน	0.0006	0.0005	15341.9998	13650.6444	0.0009	185.9095

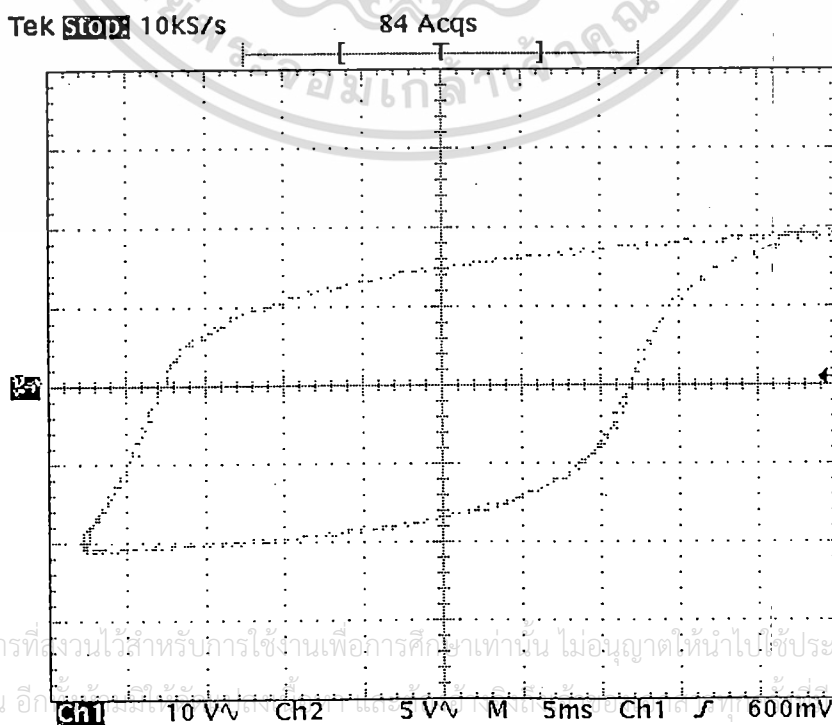
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 1
Ultrasonic transducer(SQ-40T)

วัดครั้งที่ 1

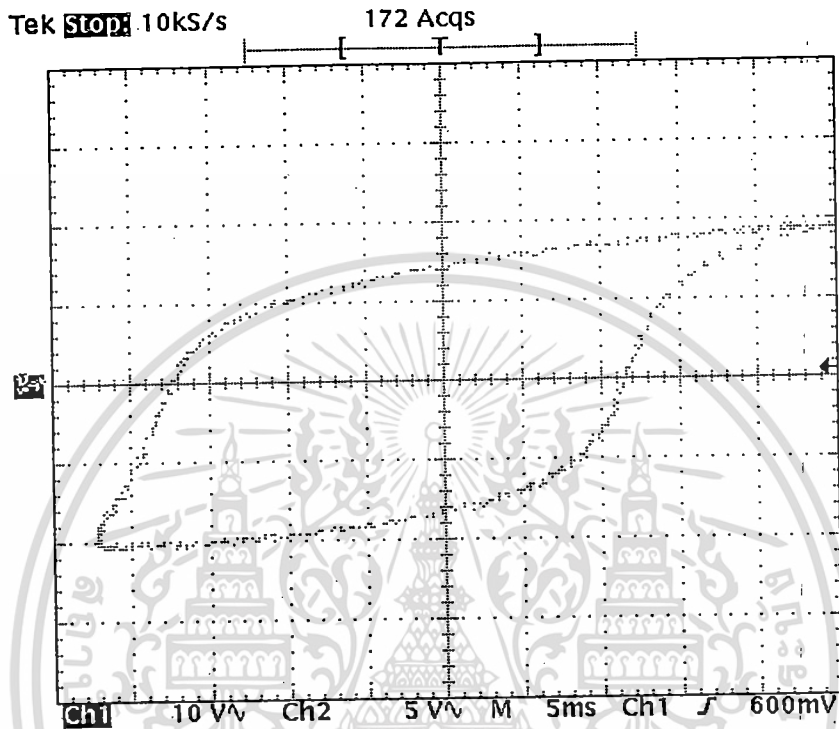


วัดครั้งที่ 2

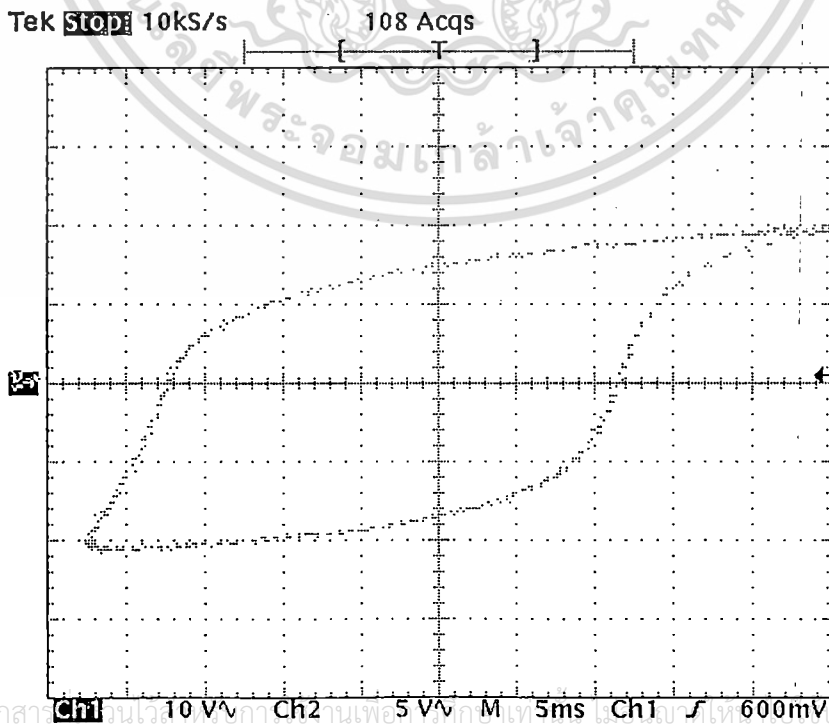


ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 1 Ultrasonic transducer(SQ-40T)

วัดครั้งที่ 3



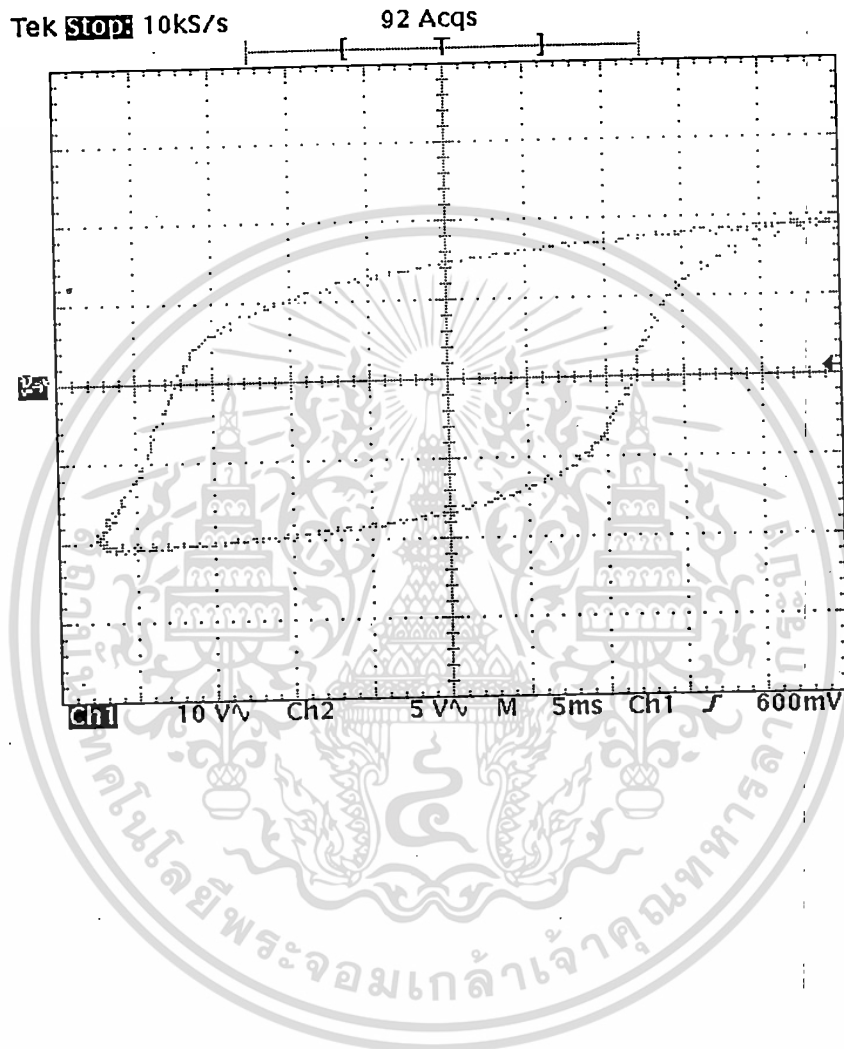
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 1
Ultrasonic transducer(SQ-40T)

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)

ความหนาของวัสดุ 8.43E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 1.940E-03 ตารางเมตร

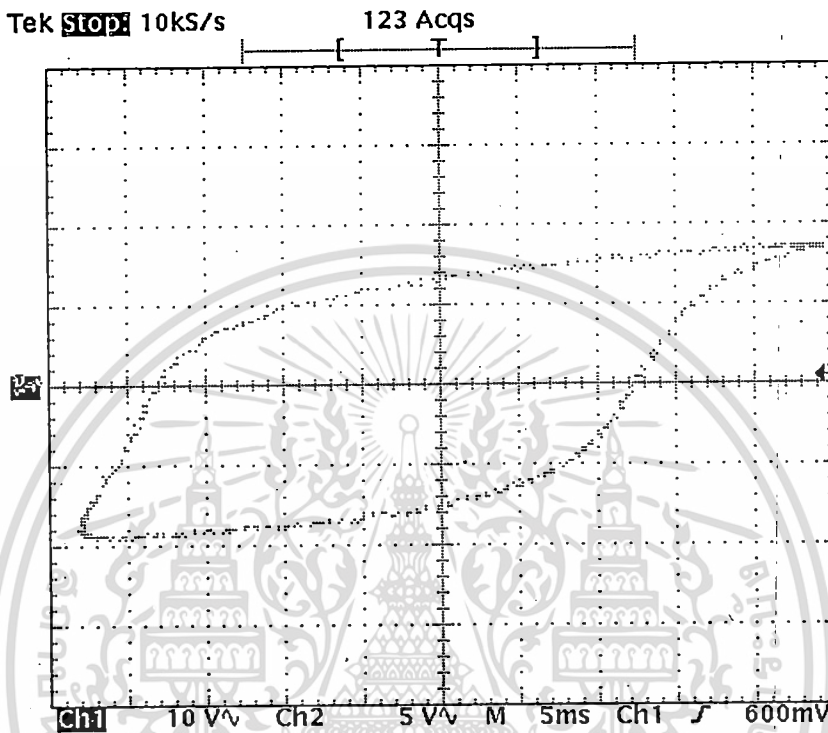
วัดครั้งที่	ค่าแรงดึงที่หักเอาได้ (แรงก)					
	ค่าโผลงไร้คดง้าง		ค่าสมมติไร้หักค้ง		ค่าโผลงไร้คดง้าง	ค่าคงที่ไดอัสตรอล
	จิกบวก	จิกลบ	จิกบวก	จิกลบ	จิกบวก	สมมติสูงสุด
1	6.7	7.6	24.0	36.0	8.8	0.186
2	6.8	7.5	25.0	36.0	8.5	0.184
3	6.8	7.5	24.8	36.0	8.8	0.188
4	6.9	7.8	24.2	36.0	9.0	0.191
5	7.0	8.0	25.0	36.0	9.0	0.176
ค่าเฉลี่ย	6.8	7.7	24.6	36.0	8.8	0.185
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1020	0.1939	0.4195	0.0000	0.1833	0.0048
ค่าความไม่แน่นอน	0.3059	0.5817	1.2586	0.0000	0.5499	0.0143

วัดครั้งที่	ค่าแรงดึงที่หักเอาลงไปในกลาง					
	ค่าโผลงไร้คดง้าง (C ความ)		ค่าสมมติไร้หักค้ง (Vmm)		ค่าโผลงไร้คดง้าง (C ความ)	ค่าคงที่ไดอัสตรอล
	จิกบวก	จิกลบ	จิกบวก	จิกลบ	จิกบวก	สมมติสูงสุด
1	0.005	0.005	313167.3	469750.9	0.006	1093.532
2	0.005	0.005	326215.9	469750.9	0.006	1082.857
3	0.005	0.005	323606.2	469750.9	0.006	1106.787
4	0.005	0.005	315777.0	469750.9	0.006	1123.064
5	0.005	0.005	326215.9	469750.9	0.006	1039.767
ค่าเฉลี่ย	0.005	0.005	320996.4	469750.9	0.006	1089.201
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0001	0.0001	5474.2099	0.0000	0.0001	28.1377
ค่าความไม่แน่นอน	0.0002	0.0004	16422.6297	0.0000	0.0004	84.4131

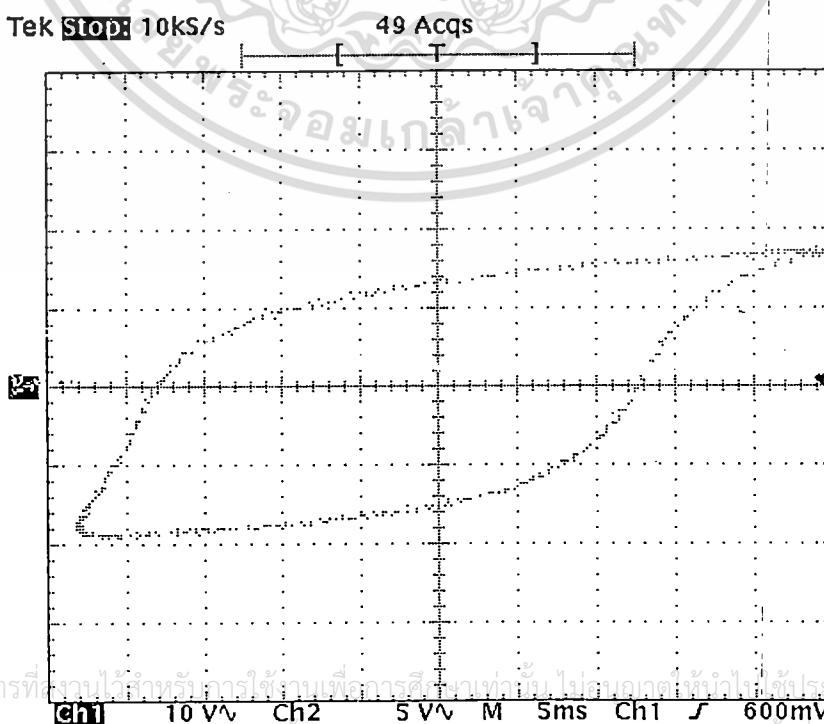
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 2 Ultrasonic transducer(SQ-40T)

วัดครั้งที่ 1



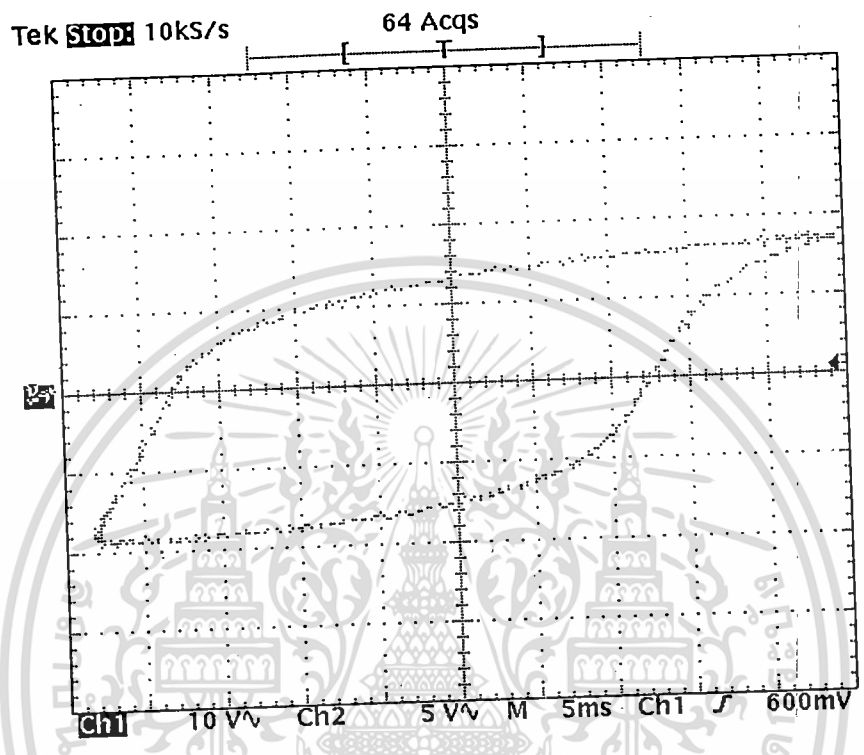
วัดครั้งที่ 2



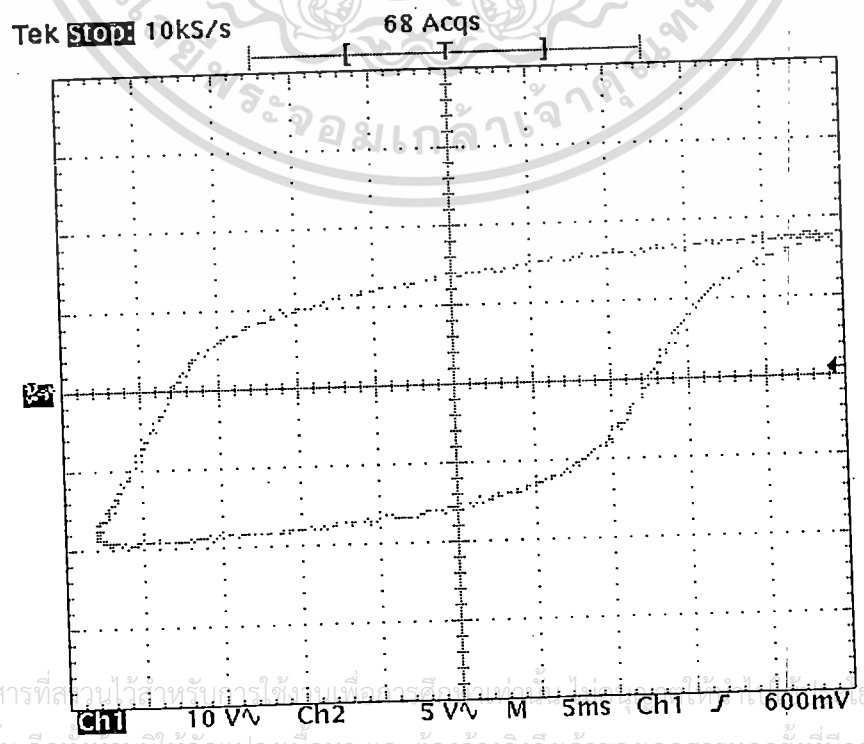
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับเพื่อการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 2
Ultrasonic transducer(SQ-40T)

วัดครั้งที่ 3



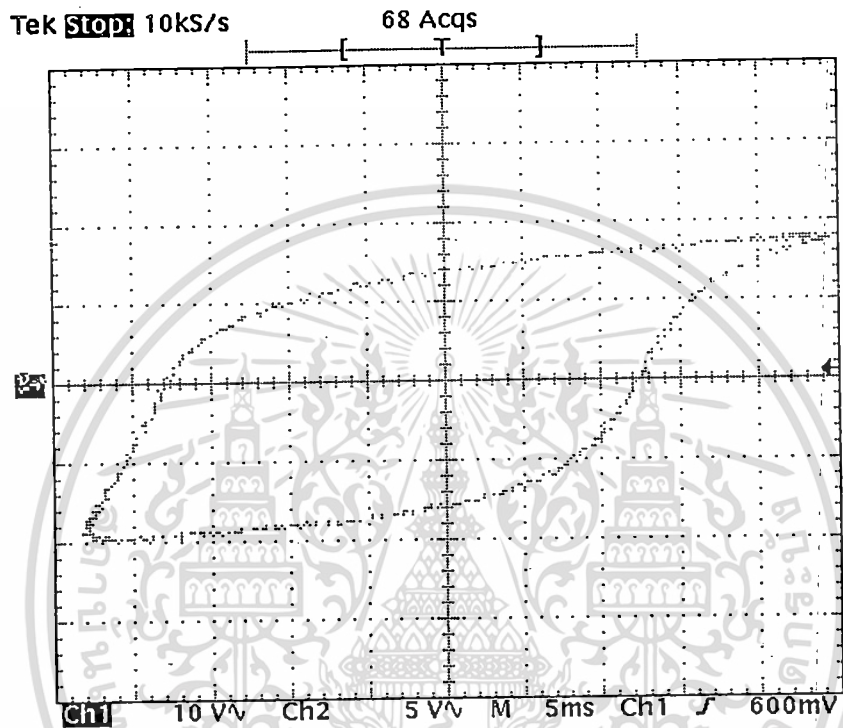
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับกรใช้ในระบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 2
Ultrasonic transducer(SQ-40T)

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)

ความหนาของวัสดุ 8.43E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 1.940E-03 ตารางเมตร

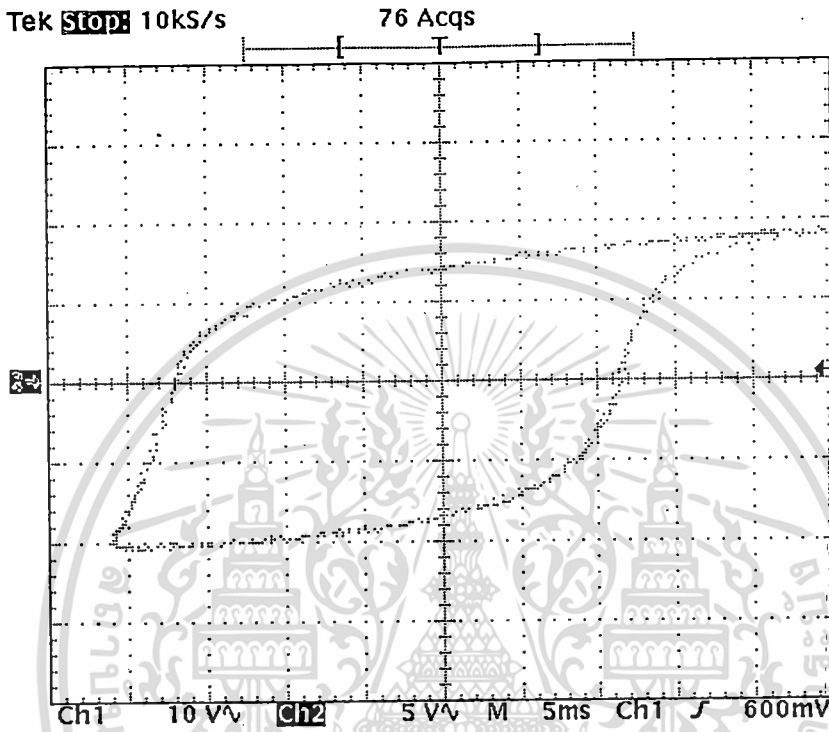
วัตถุจริง	กษณรวม ไฟฟ้าจันใต้ (โวลท์)					
	ค่าโวลท์โวลท์คง		ค่าแอมป์โวลท์นิ่ง		ค่าโวลท์โวลท์คว	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	ซิกมวค	ซิกลบ	ซิกมวค	ซิกลบ	ซิกมวค	สัมพัทธ์สูงสุด
1	7.0	8.2	23.0	34.0	9.0	0.213
2	8.0	9.0	23.0	34.0	10.0	0.233
3	7.8	9.0	23.0	34.0	10.0	0.233
4	8.0	9.5	22.0	33.0	10.7	0.268
5	8.0	9.0	22.0	33.0	10.1	0.241
ค่าเฉลี่ย	7.8	8.9	22.6	33.6	10.0	0.238
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.3878	0.4176	0.4899	0.4899	0.5463	0.0178
ค่าความไม่แน่นอน	1.1634	1.2528	1.4697	1.4697	1.6388	0.0534

วัตถุจริง	กษณรวม ไฟฟ้าจันใต้ (โวลท์)					
	ค่าโวลท์โวลท์คง (C/ตรม)		ค่าแอมป์โวลท์นิ่ง (V/m)		ค่าโวลท์โวลท์คว (C/ตรม)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	ซิกมวค	ซิกลบ	ซิกมวค	ซิกลบ	ซิกมวค	สัมพัทธ์สูงสุด
1	0.005	0.006	300118.6	443653.6	0.006	1253.620
2	0.005	0.006	300118.6	443653.6	0.007	1374.803
3	0.005	0.006	300118.6	443653.6	0.007	1374.803
4	0.005	0.006	287070.0	430605.0	0.007	1578.218
5	0.005	0.006	287070.0	430605.0	0.007	1422.210
ค่าเฉลี่ย	0.005	0.006	294899.2	438434.2	0.007	1400.731
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0003	0.0003	6392.4999	6392.4999	0.0004	104.8324
ค่าความไม่แน่นอน	0.0008	0.0009	19177.4998	19177.4998	0.0011	314.4972

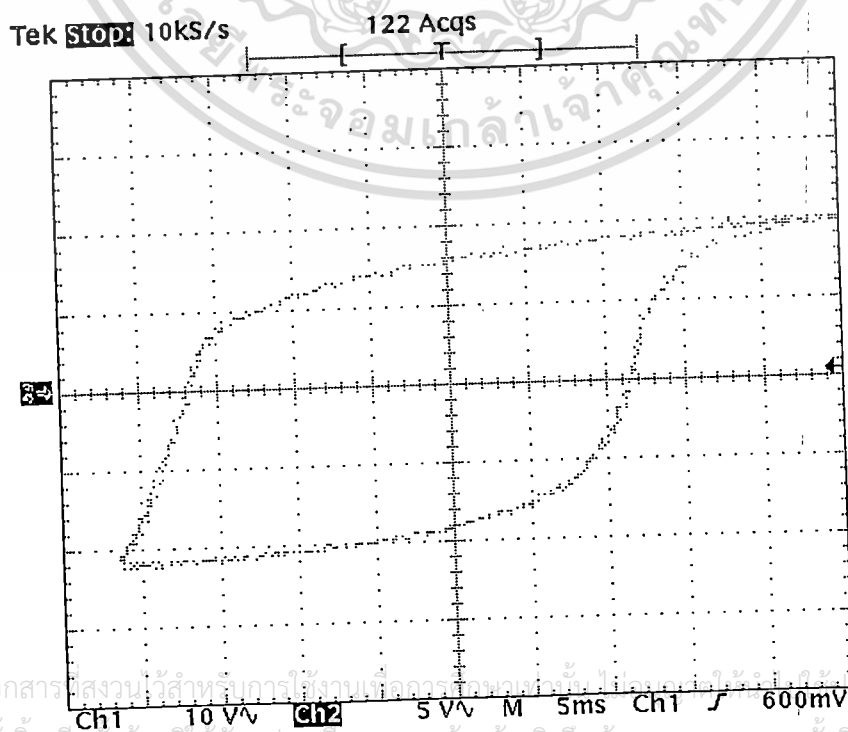
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 3
Ultrasonic transducer(SQ-40R)

วัดครั้งที่ 1



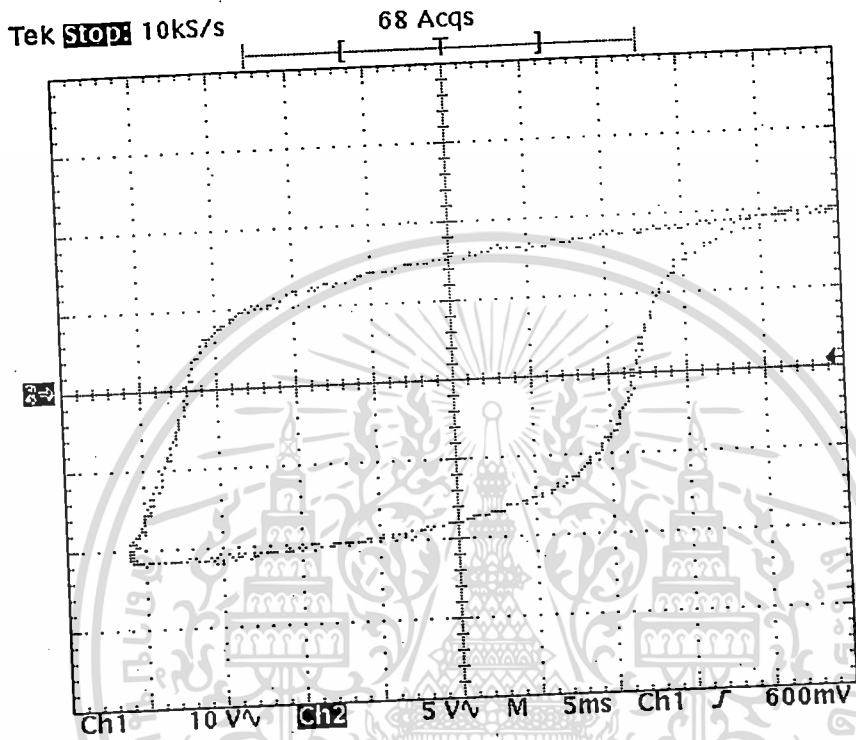
วัดครั้งที่ 2



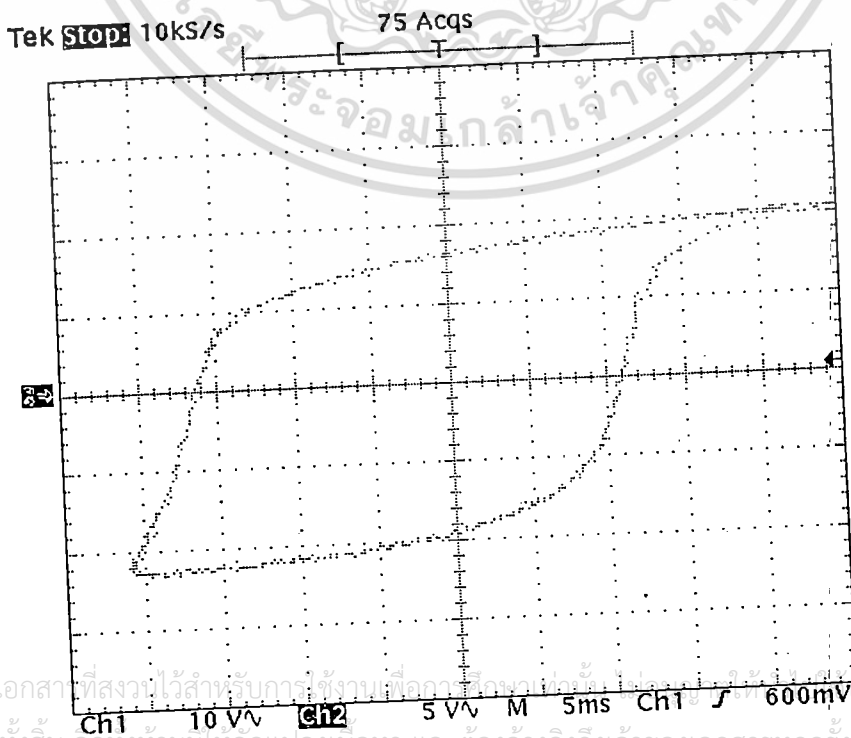
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้วงเทอลอรองพวงเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปนอกระบบงานของหน่วยงาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 3
Ultrasonic transducer(SQ-40R)

วัดครั้งที่ 3



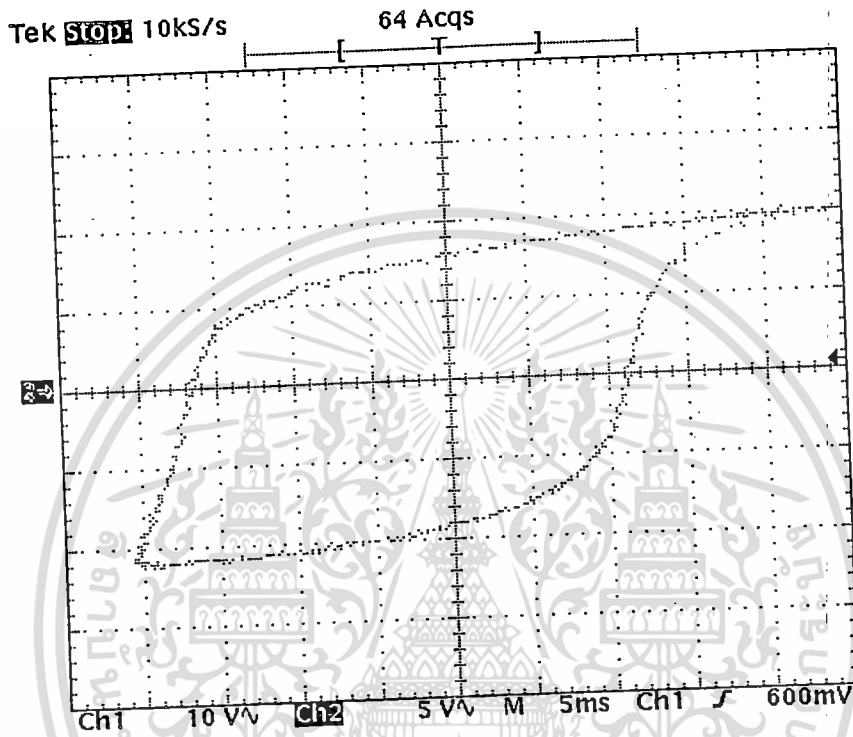
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้ข้อมูลหรือประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 3
 Ultrasonic transducer(SQ-40R)

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)

ความหนาของวัสดุ 8.43E-04 มม

พื้นที่หน้าตัด 1.940E-03 ตารางเมตร

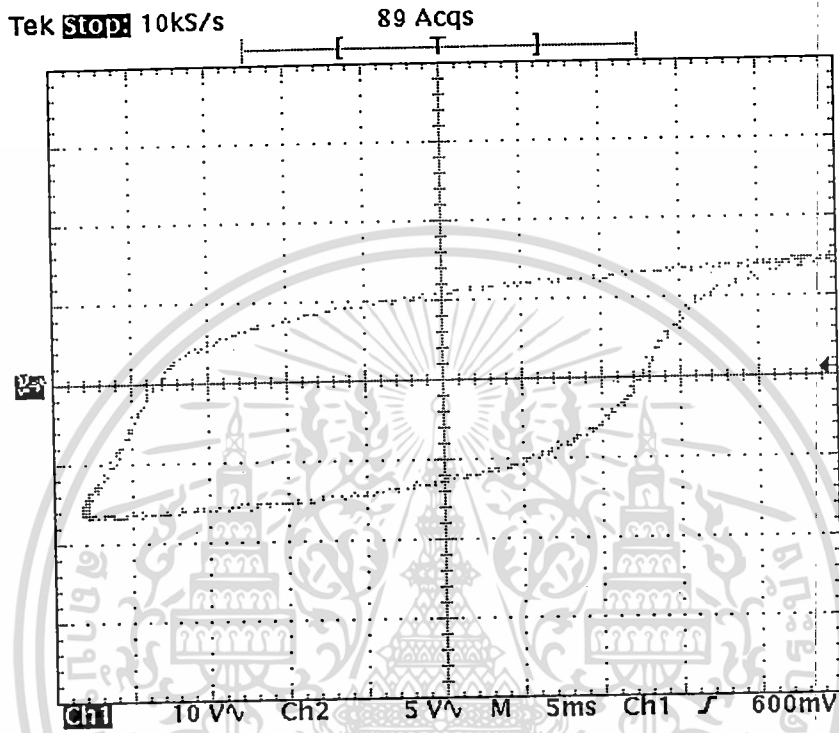
วัดครั้งที่	ค่าแรงคั้นไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลต์)					
	ค่าโพสิทีฟแรงคั้น		ค่าเนกาทีฟแรงคั้น		ค่าโวลตาจเรจันตัว	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	ซีลบวก	ซีลลบ	ซีลบวก	ซีลลบ	ซีลบวก	สัมพัทธ์สูงสุด
1	5.5	6.0	24.0	36.0	7.5	0.147
2	6.0	6.7	25.0	36.0	7.9	0.176
3	6.0	6.7	25.0	36.0	8.0	0.176
4	5.5	6.5	26.0	37.0	7.2	0.161
5	5.5	6.2	26.0	38.0	7.5	0.157
ค่าเฉลี่ย	5.7	6.4	25.2	36.6	7.6	0.164
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2449	0.2786	0.7483	0.8000	0.2926	0.0114
ค่าความไม่แน่นอน	0.7348	0.8357	2.2450	2.4000	0.8777	0.0343

วัดครั้งที่	ค่าแรงที่ดึงกลแรงทนลงที่ไม่เสถียร					
	ค่าโพสิทีฟแรงคั้น (C/ตรม)		ค่าเนกาทีฟแรงคั้น (V/m)		ค่าโวลตาจเรจันตัว (C/ตรม)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	ซีลบวก	ซีลลบ	ซีลบวก	ซีลลบ	ซีลบวก	สัมพัทธ์สูงสุด
1	0.004	0.004	313167.3	469750.9	0.005	866.473
2	0.004	0.005	326215.9	469750.9	0.005	1039.767
3	0.004	0.005	326215.9	469750.9	0.005	1039.767
4	0.004	0.004	339264.5	482799.5	0.005	947.546
5	0.004	0.004	339264.5	495848.2	0.005	925.888
ค่าเฉลี่ย	0.004	0.004	328825.6	477580.1	0.005	963.888
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0002	0.0002	9764.7049	10438.9087	0.0002	67.4034
ค่าความไม่แน่นอน	0.0005	0.0006	29294.1148	31316.7260	0.0006	202.2103

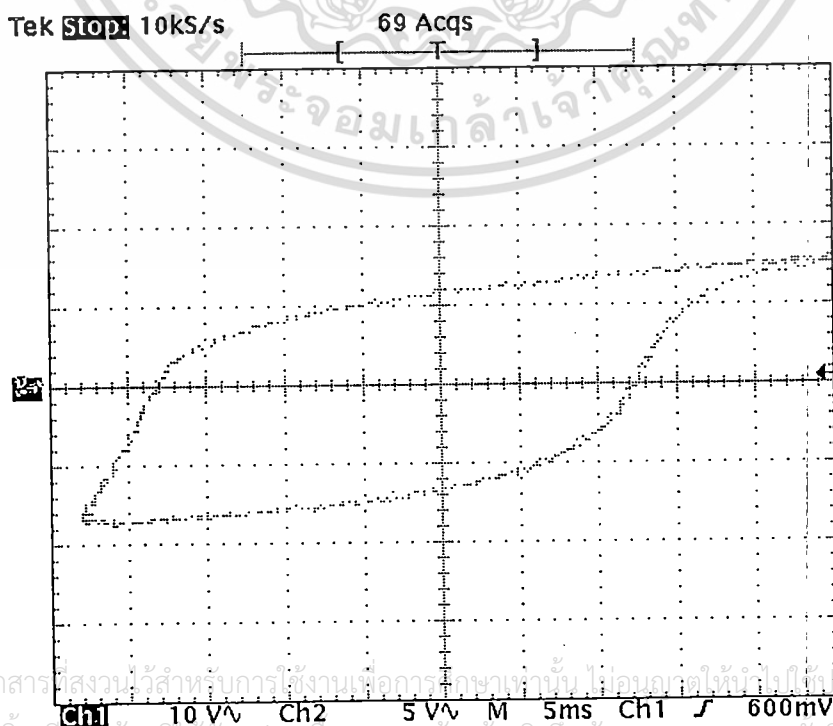
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 4
Ultrasonic transducer(SQ-40R)

วัดครั้งที่ 1



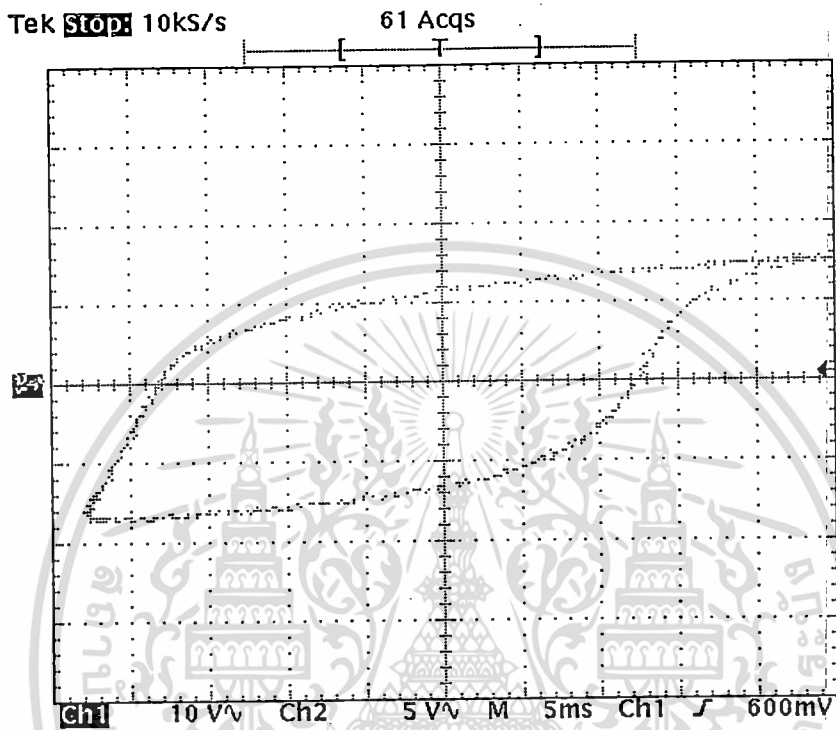
วัดครั้งที่ 2



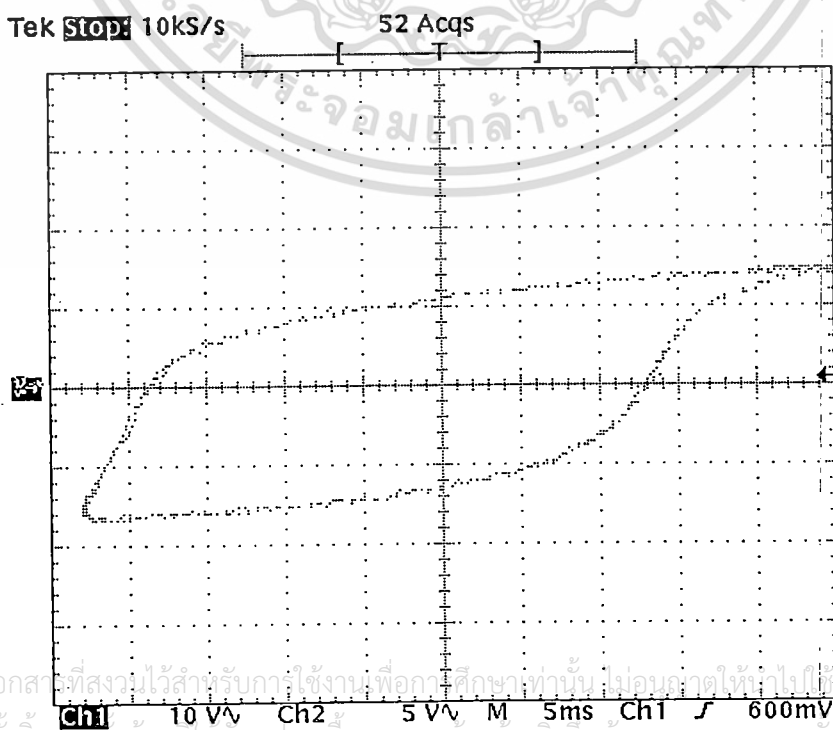
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 4
Ultrasonic transducer(SQ-40R)

วัดครั้งที่ 3



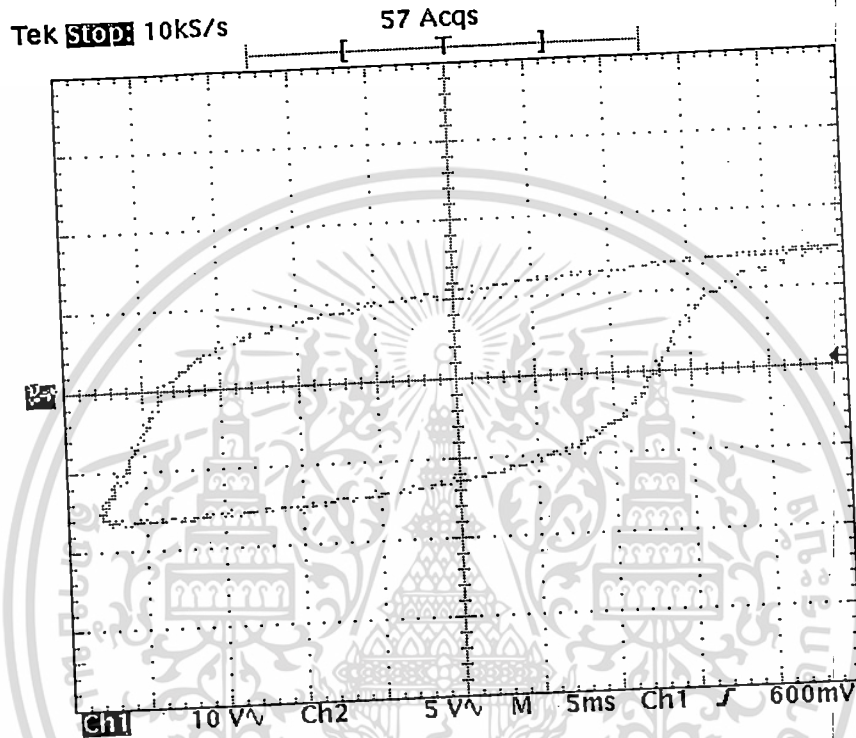
วัดครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ P-E ฮิสเทอรีซิสสำหรับวัสดุทดสอบตัวที่ 4
 Ultrasonic transducer(SQ-40R)

วัดครั้งที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างเครื่องทดสอบอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์โดยอาศัยหลักการวัดฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุประเภทเฟอร์โรอิเล็กทริก หลักการทำงานพื้นฐานของชุดทดสอบคือการป้อนสนามไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าไปตกคร่อมวัสดุที่ต้องการทดสอบ แล้ววัดผลการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุทดสอบนั้นๆ โดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุซึ่งแปรผันกับการโพลาไรซ์ของวัสดุตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบวัสดุ 2 ชนิดด้วยชุดทดสอบที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นได้แก่ ลำโพงบัสเซอร์ซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดหนึ่งและอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ทั้งชนิดตัวส่งและตัวรับในย่านความถี่ 40 kHz ในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์เท่านั้น

จากสัญญาณภาพฮิสเทอรีซิสลูปที่ได้จากการทดสอบตัวส่งและตัวรับวัดอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์พบว่าเราสามารถที่จะนำไปหาค่าโพลาไรซ์คงค้าง (Remanent polarization) ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (Coercive electric field) ค่าโพลาไรซ์อิ่มตัว (Saturated polarization) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของวัสดุที่นำมาทดสอบได้ ซึ่งช่วยให้เราารู้คุณสมบัติของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวนั้นๆ ได้ ในกรณีของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้เป็นการโพลาไรซ์ในเนื้อวัสดุ โดยวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูงแสดงว่าวัสดุตัวนั้นสามารถเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ไปเป็นการโพลาไรซ์ในวัสดุได้ง่าย กล่าวคือสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์ที่มีค่าสูงๆได้ ในกรณีที่พิจารณาตัวส่งอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองตัวที่ 1 และตัวที่ 2 พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1234.821 และ 1089.201 พารัดต่อเมตรตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า ตัวส่งตัวที่ 1 นั้นมีความสามารถในการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ไปเป็นการโพลาไรซ์ได้ดีกว่าตัวส่งตัวที่ 2 ทำนองเดียวกันในการพิจารณาตัวรับอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุทดสอบตัวที่ 3 และตัวที่ 4 พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1400.731 และ 963.888 พารัดต่อเมตรตามลำดับ จะหมายความว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าตัวรับตัวที่ 4 จะมีความสามารถในการเปลี่ยนสนามโพลาไรซ์จากแรงที่มากระทำของคลื่นอัลตราโซนิกไปเป็นสนามไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวรับตัวที่ 3

งานที่น่าดำเนินการต่อไปคือการหาวัสดุที่ทราบค่าที่ถูกต้องแน่นอนมาทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบเครื่องมือว่ามีความถูกต้องเพียงใด และหาแนวทางปรับปรุงและแก้ไขข้อผิดพลาด อีกทั้งจากการทดลองเห็นว่าวิธีการนี้เราสามารถที่จะพิจารณาค่าคุณสมบัติต่างๆของวัสดุได้เพียงความถี่เดียวคือ 50 Hz จึงมีความคิดว่าควรที่จะพัฒนาแหล่งกำเนิดแรงดันนี้ให้สามารถปรับความถี่ได้ เพื่อพิจารณาที่เงื่อนไขของความถี่ต่างๆกันออกไป นอกจากนี้แล้วยังจะเห็นว่าวิธีการนี้ยังต้องอาศัยการอ่านค่าตัวเลขจากผู้ทดลองจึงอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ น่าจะมีการประยุกต์ชุดทดลองเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกในการทดลองและพัฒนาต่อไป



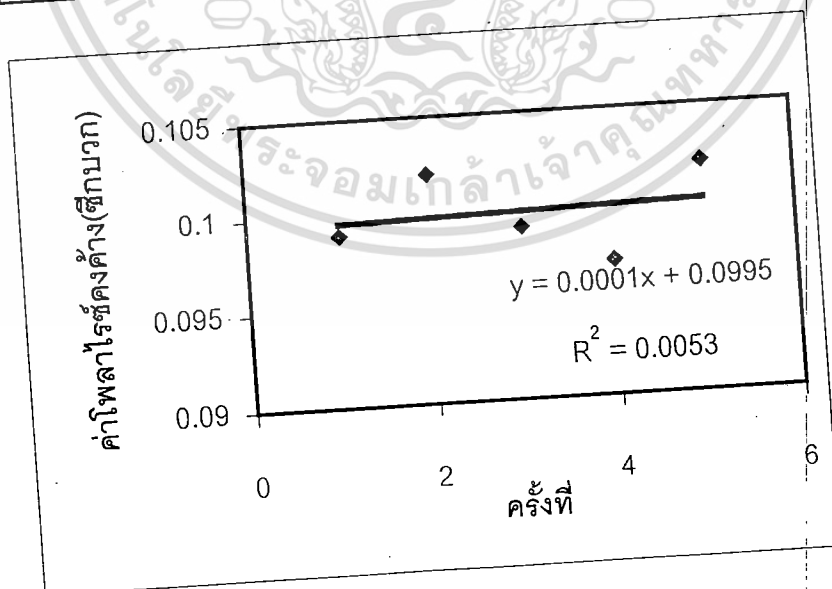


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1	
ความหนาของวัสดุ	2.560E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.211E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาริซิงค์ค่าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาริซิงค์ค่าง(ซีกบวก)
1	0.099
2	0.102
3	0.099
4	0.097
5	0.102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

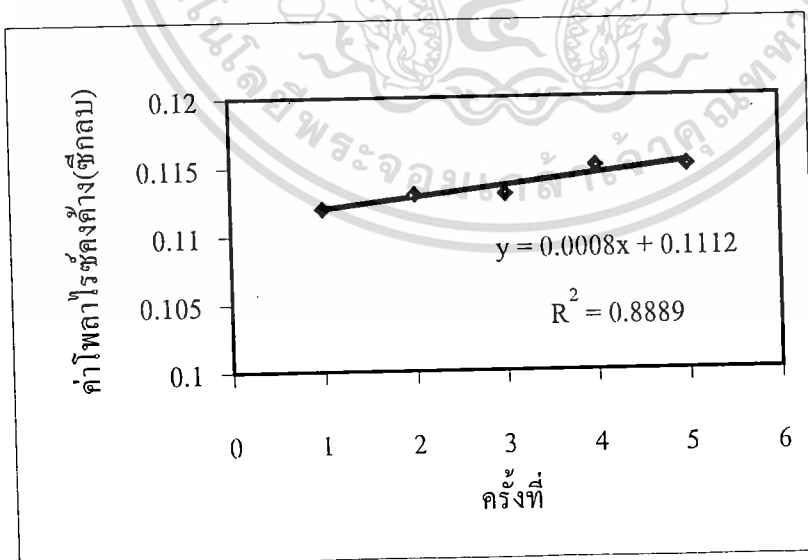
วัสดุทดสอบตัวที่ 1

ความหนาของวัสดุ 2.560E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.211E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปนสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	0.112
2	0.113
3	0.113
4	0.115
5	0.115

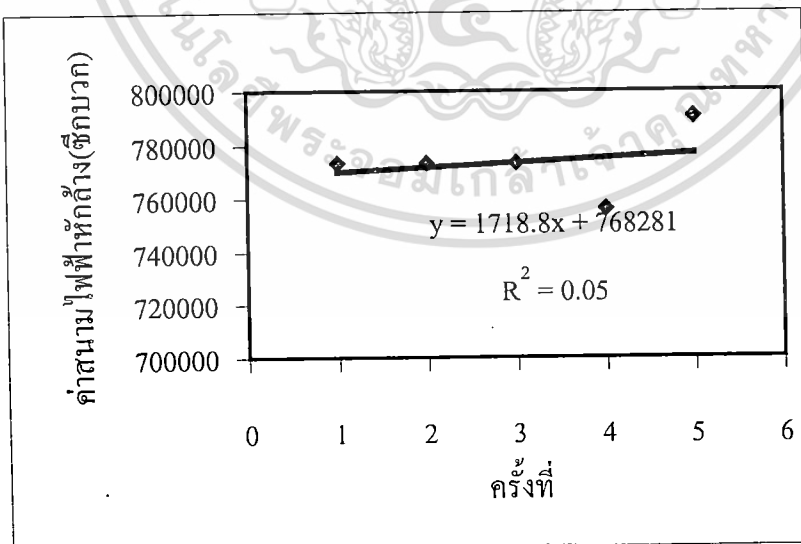


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1	
ความหนาของวัสดุ	2.560E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.211E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	773437.5
2	773437.5
3	773437.5
4	756250
5	790625

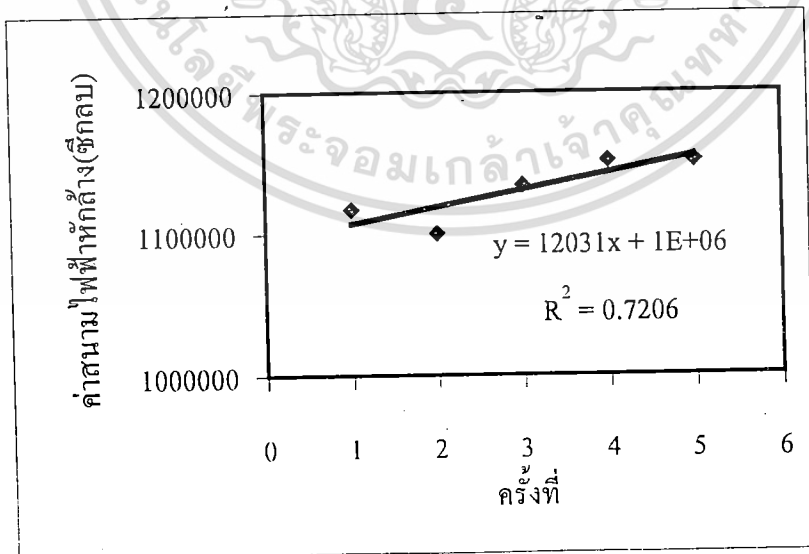


วัสดุทดสอบตัวที่ 1

ความหนาของวัสดุ	2.560E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.211E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกัลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกัลบ)
1	1117187.5
2	1100000
3	1134375
4	1151562.5
5	1151562.5



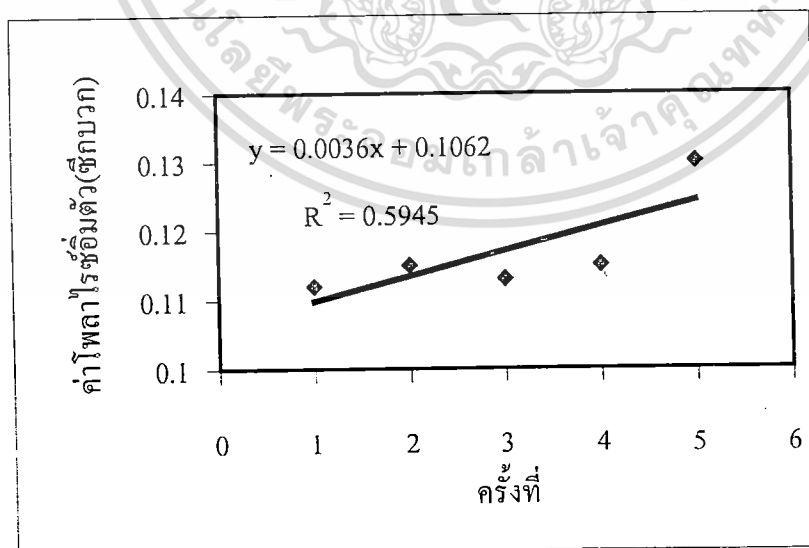
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1

ความหนาของวัสดุ	2.560E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.211E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)
1	0.112
2	0.115
3	0.113
4	0.115
5	0.13

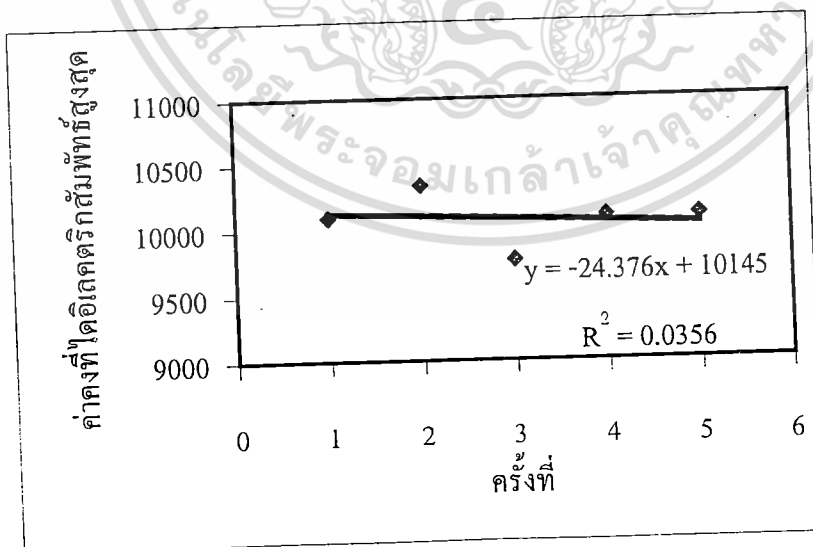


วัสดุทดสอบตัวที่ 1

ความหนาของวัสดุ 2.560E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด 3.211E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	10089.611
2	10333.372
3	9759.296
4	10089.611
5	10089.611

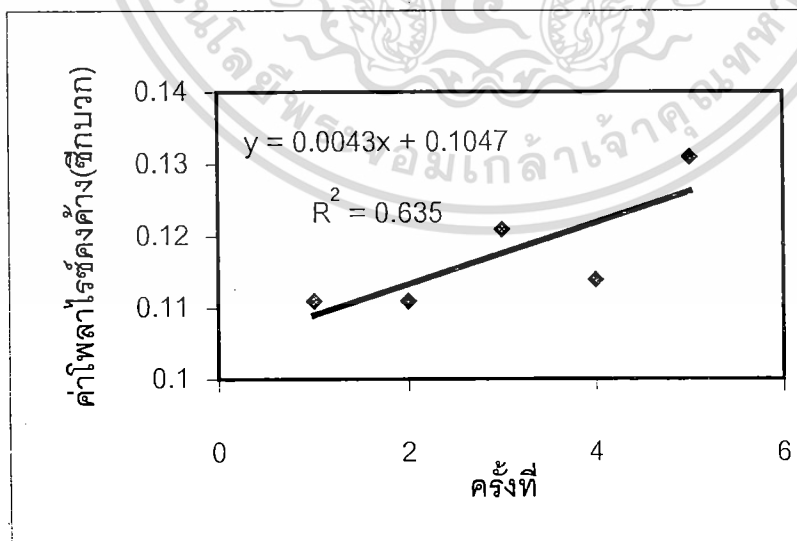


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2	
ความหนาของวัสดุ	2.480E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.230E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)
1	0.111
2	0.111
3	0.121
4	0.114
5	0.131

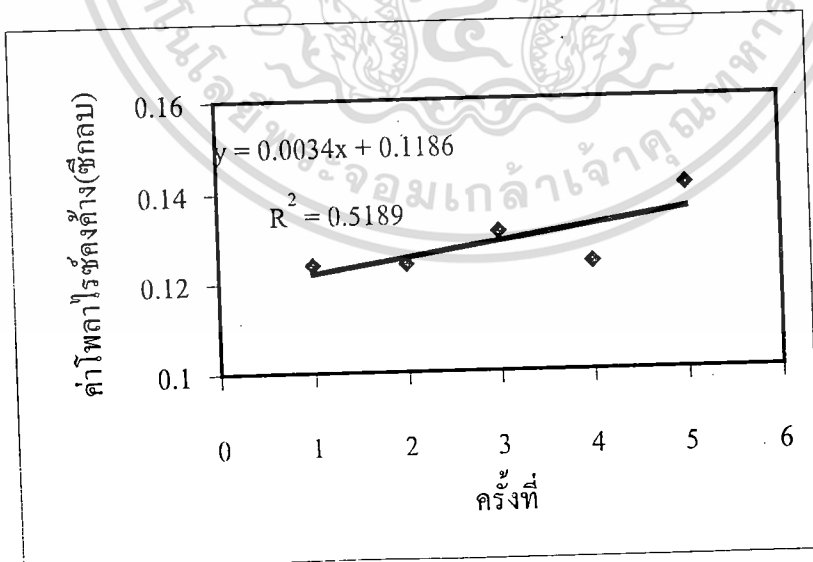


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2	
ความหนาของวัสดุ	2.480E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.230E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

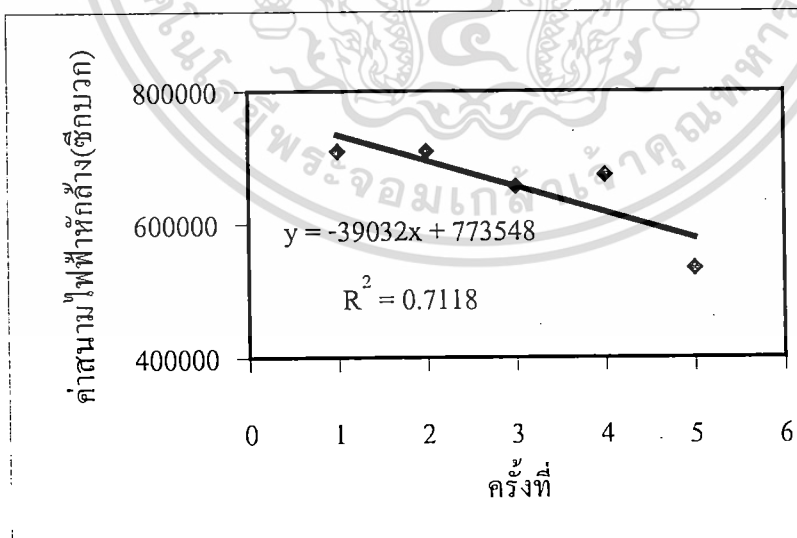
ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	0.124
2	0.124
3	0.131
4	0.124
5	0.141



วัสดุทดสอบตัวที่ 2	
ความหนาของวัสดุ	2.480E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.230E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	709677.4
2	709677.4
3	656451.6
4	674193.5
5	532258.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

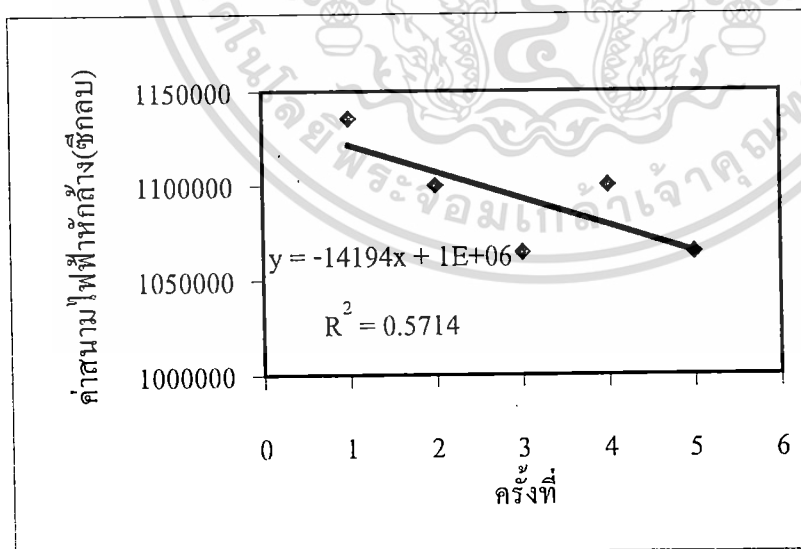
วัสดุทดสอบตัวที่ 2

ความหนาของวัสดุ 2.480E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.230E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกัลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแปลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกัลบ)
1	1135483.9
2	1100000
3	1064516.1
4	1100000
5	1064516.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

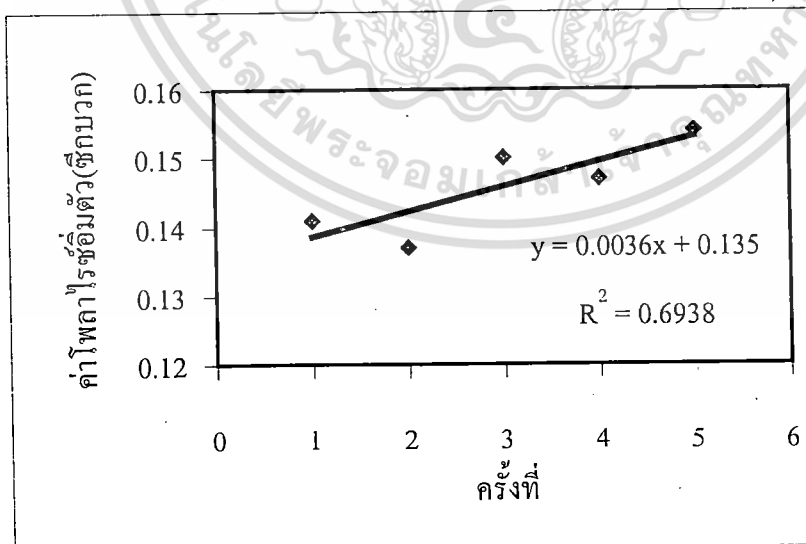
วัสดุทดสอบตัวที่ 2

ความหนาของวัสดุ 2.480E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.230E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาริซิมตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

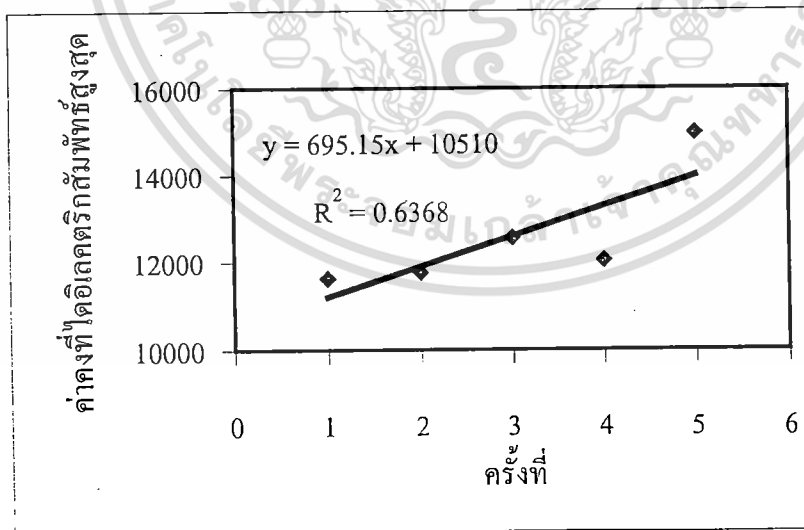
ครั้งที่	ค่าโพลาริซิมตัว(ซีกบวก)
1	0.141
2	0.137
3	0.15
4	0.147
5	0.154



วัสดุทดสอบตัวที่ 2	
ความหนาของวัสดุ	2.480E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.230E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	11635.681
2	11768.813
3	12559.148
4	12037.571
5	14977.045



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

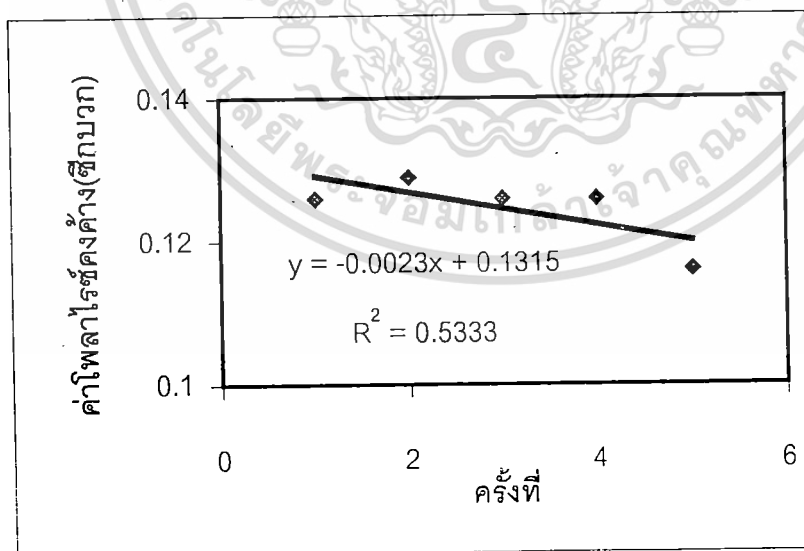
วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ 2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.269E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาริซิงค์ค่าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาริซิงค์ค่าง(ซีกบวก)
1	0.126
2	0.129
3	0.126
4	0.126
5	0.116



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ

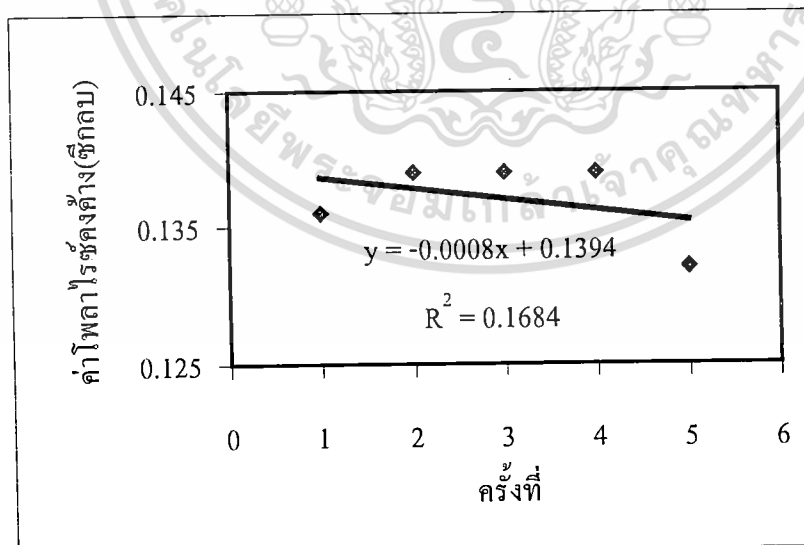
2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.269E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	0.136
2	0.139
3	0.139
4	0.139
5	0.132



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

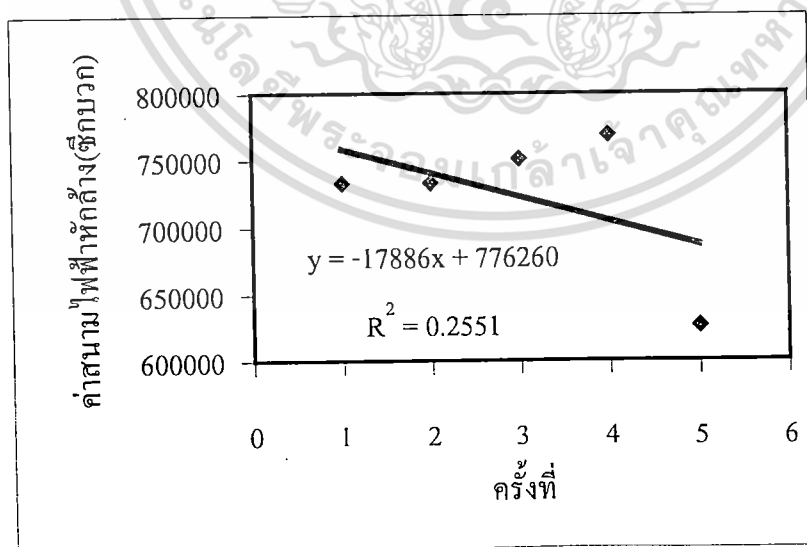
วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ 2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.269E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	733333.3
2	733333.3
3	751219.5
4	769105.7
5	626016.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

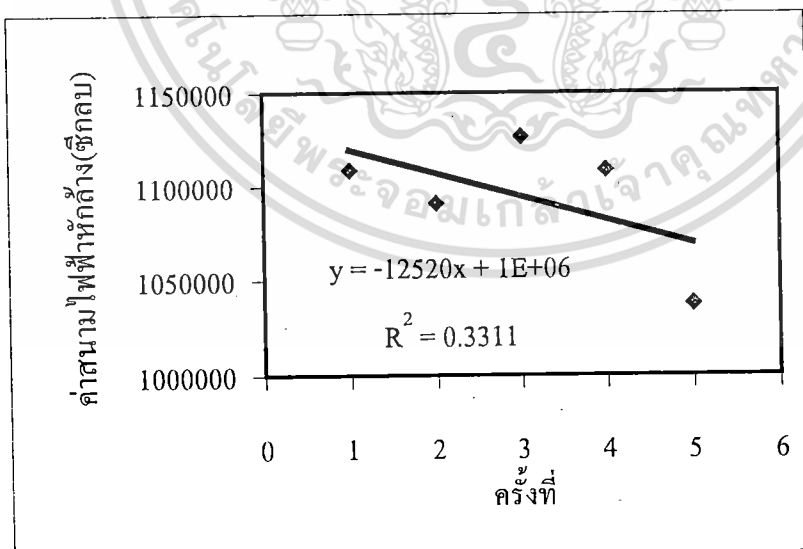
วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ 2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.269E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)
1	1108943.1
2	1091056.9
3	1126829.3
4	1108943.1
5	1037398.4



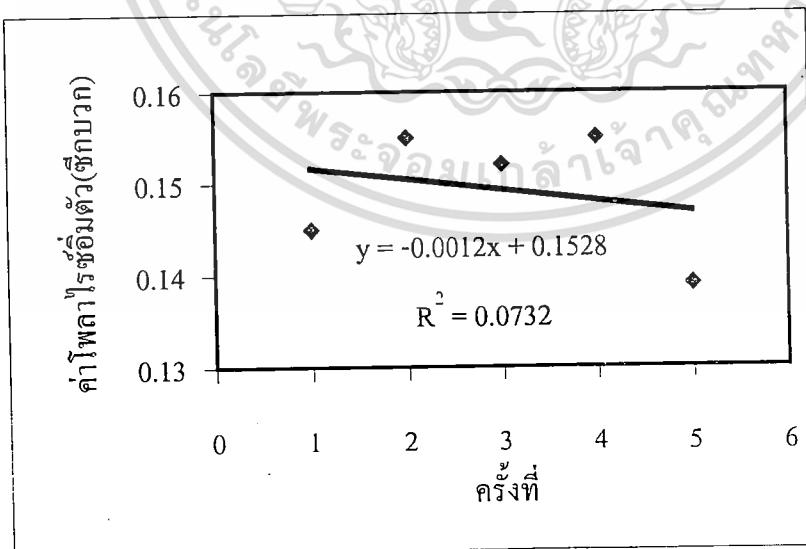
วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ 2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.269E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาริซิมตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาริซิมตัว(ซีกบวก)
1	0.145
2	0.155
3	0.152
4	0.155
5	0.139



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

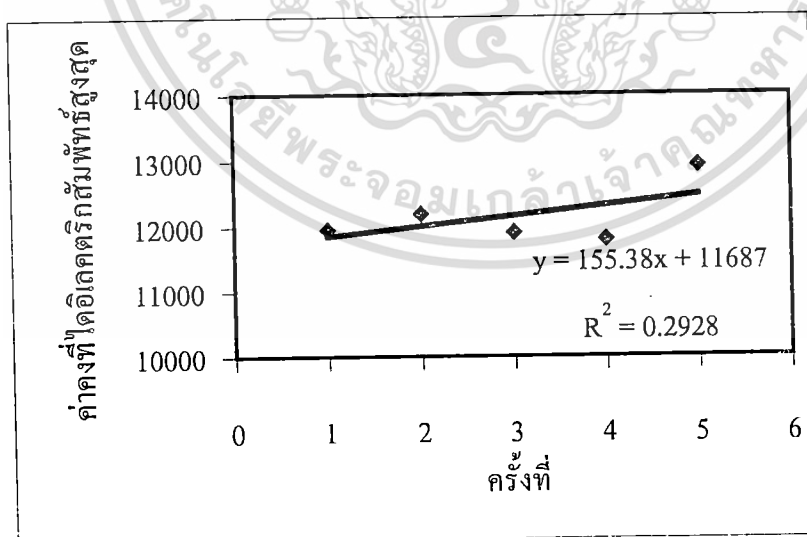
วัสดุทดสอบตัวที่ 3

ความหนาของวัสดุ 2.46E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.269E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	11952.919
2	12187.766
3	11904.33
4	11798.041
5	12924.701

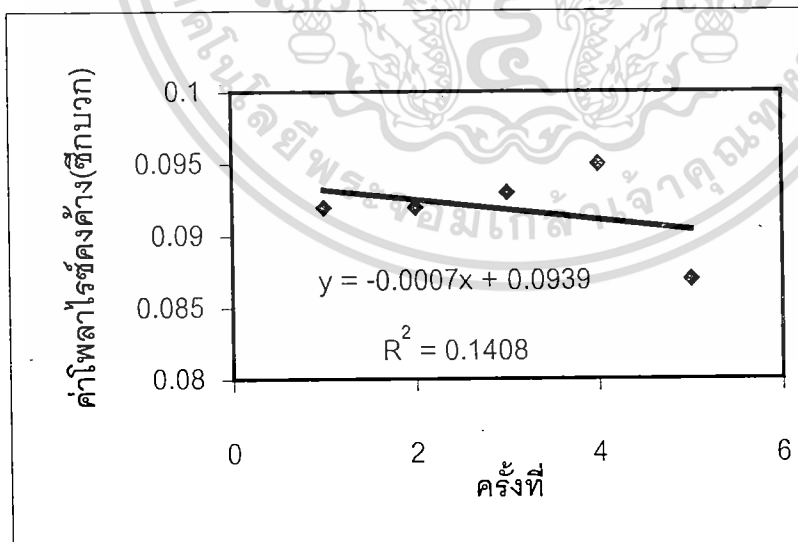


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4	
ความหนาของวัสดุ	2.33E-04 เมตร
พื้นที่หน้าตัด	3.2249E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาริซันซ์ค่าโพลาริซันซ์ค้ำ(ซีกบว)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาริซันซ์ค้ำ(ซีกบว)
1	0.092
2	0.092
3	0.093
4	0.095
5	0.087



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4

ความหนาของวัสดุ

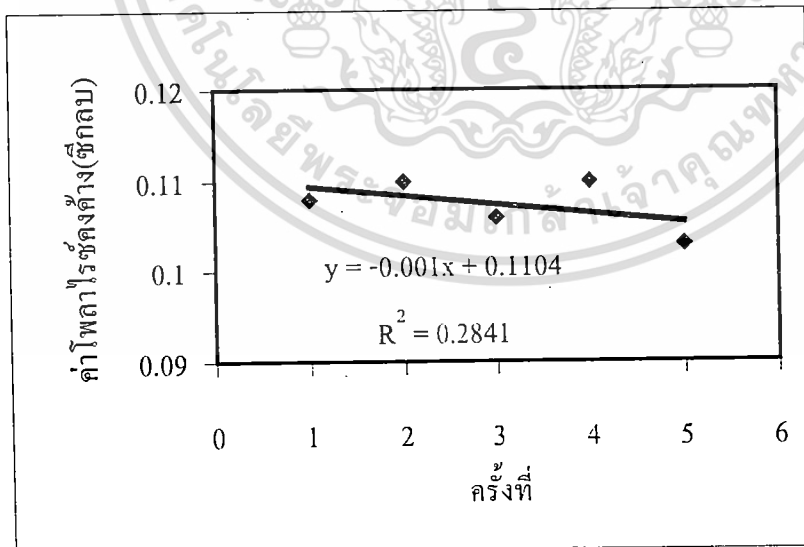
2.33E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.2249E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	0.108
2	0.11
3	0.106
4	0.11
5	0.103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

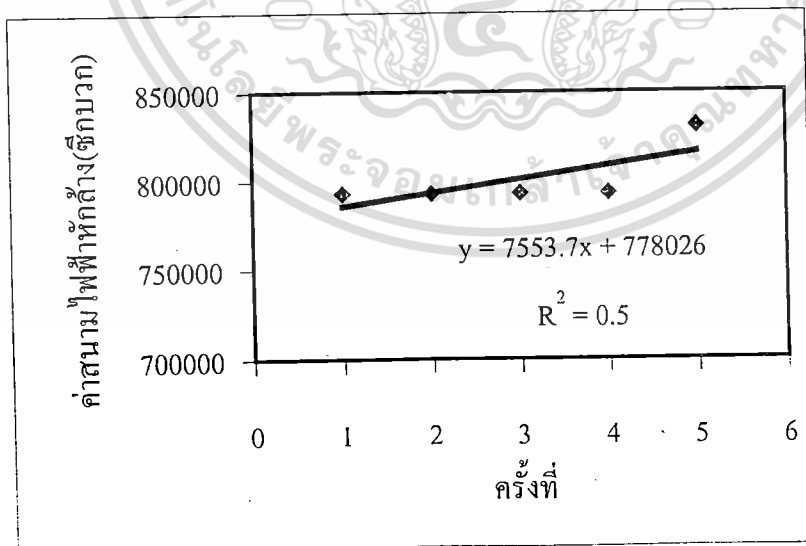
วัสดุทดสอบตัวที่ 4

ความหนาของวัสดุ 2.33E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.2249E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	793133
2	793133
3	793133
4	793133
5	830901.3



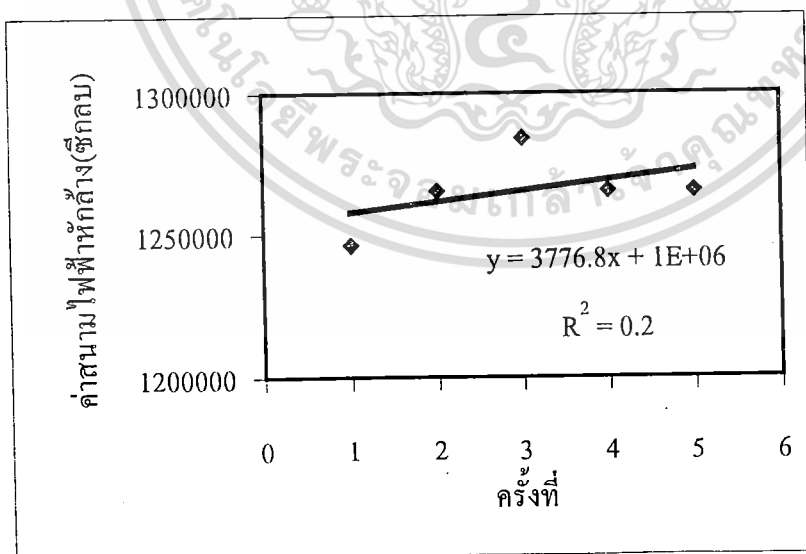
วัสดุทดสอบตัวที่ 4

ความหนาของวัสดุ 2.33E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.2249E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)
1	1246351.9
2	1265236.1
3	1284120.2
4	1265236.1
5	1265236.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4

ความหนาของวัสดุ

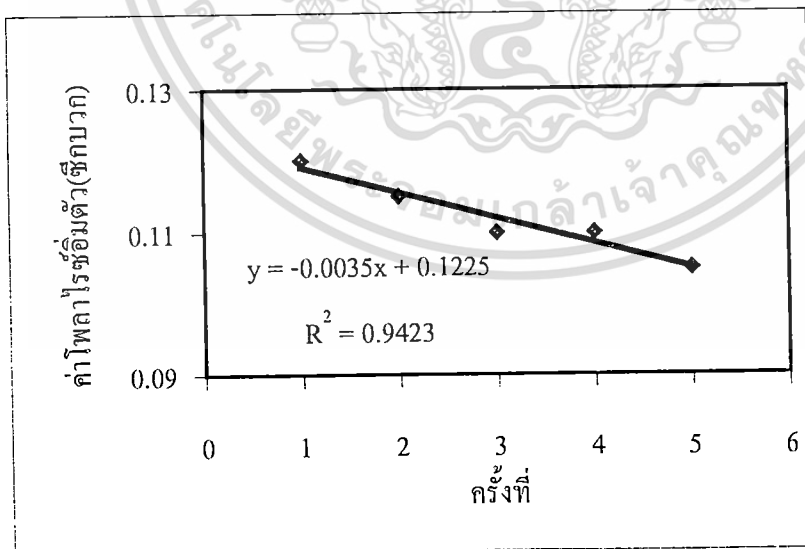
2.33E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด

3.2249E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการทดลองไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)
1	0.12
2	0.115
3	0.11
4	0.11
5	0.105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

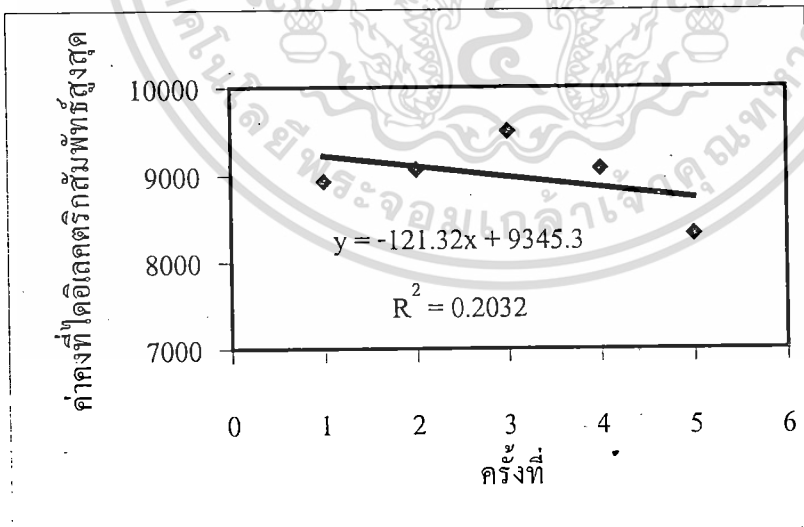
วัสดุทดสอบตัวที่ 4

ความหนาของวัสดุ 2.33E-04 เมตร

พื้นที่หน้าตัด 3.2249E-04 เมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	8934.734
2	9068.089
3	9502.435
4	9078.843
5	8322.766

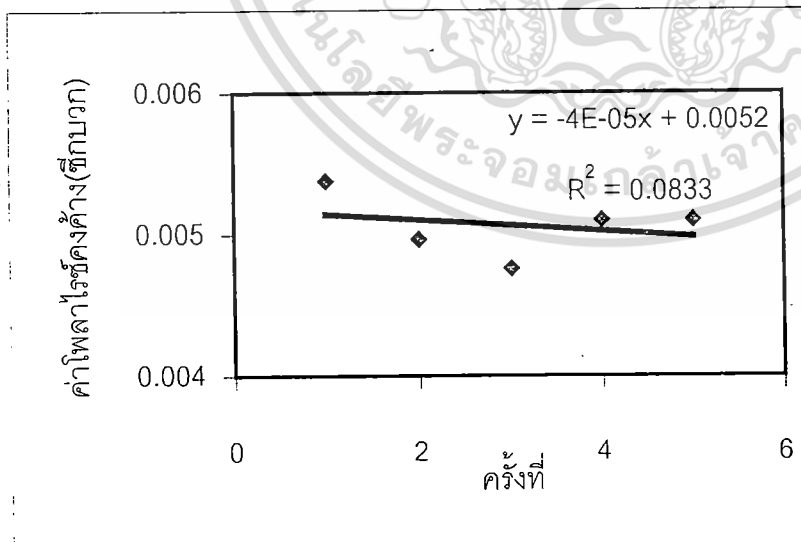


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)
1	0.005
2	0.005
3	0.005
4	0.005
5	0.005

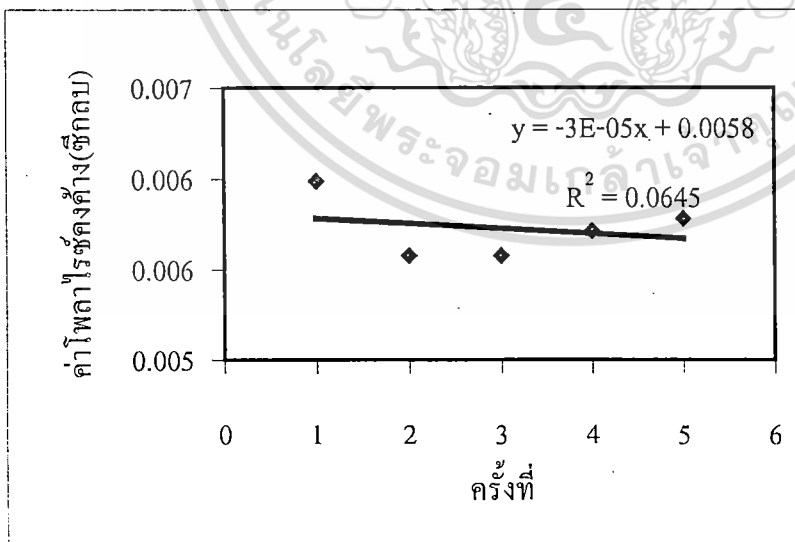


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปนสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	0.006
2	0.006
3	0.006
4	0.006
5	0.006



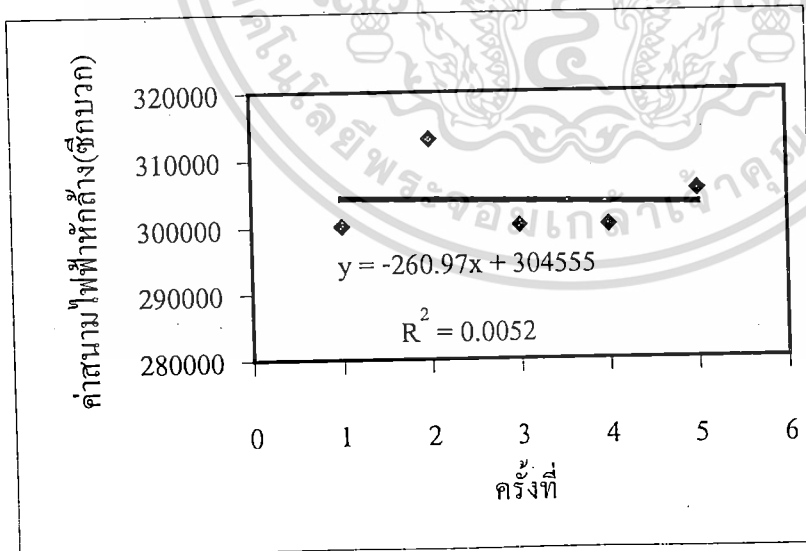
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)

ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	300118.624
2	313167.260
3	300118.624
4	300118.624
5	305338.078

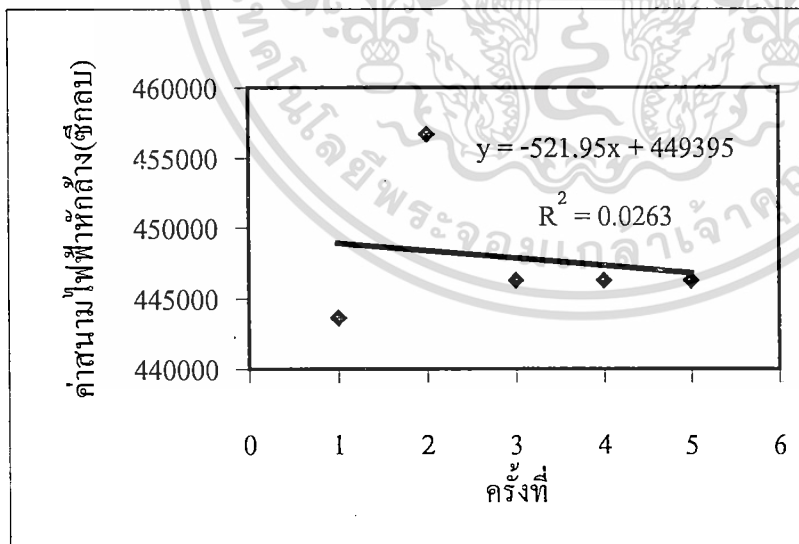


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปนสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)
1	443653.618
2	456702.254
3	446263.345
4	446263.345
5	446263.345

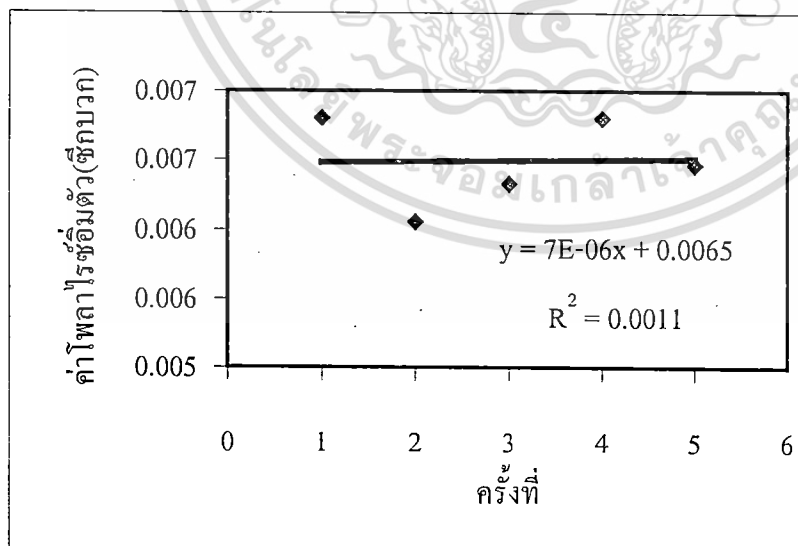


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)
1	0.007
2	0.006
3	0.006
4	0.007
5	0.006

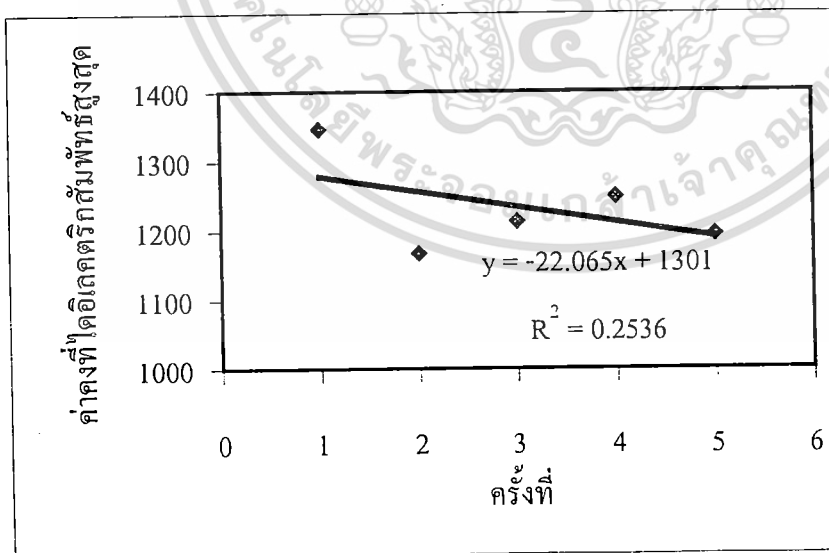


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 1: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	1346.746
2	1167.944
3	1214.112
4	1249.821
5	1195.481

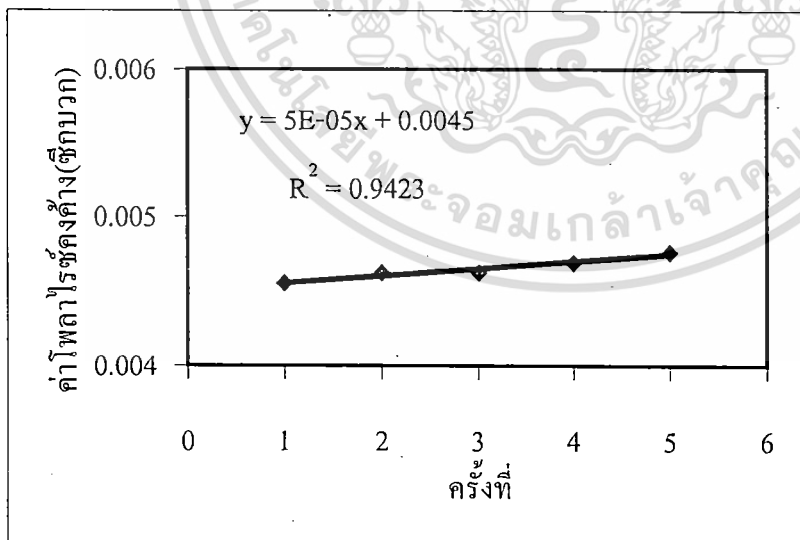


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)
1	0.005
2	0.005
3	0.005
4	0.005
5	0.005

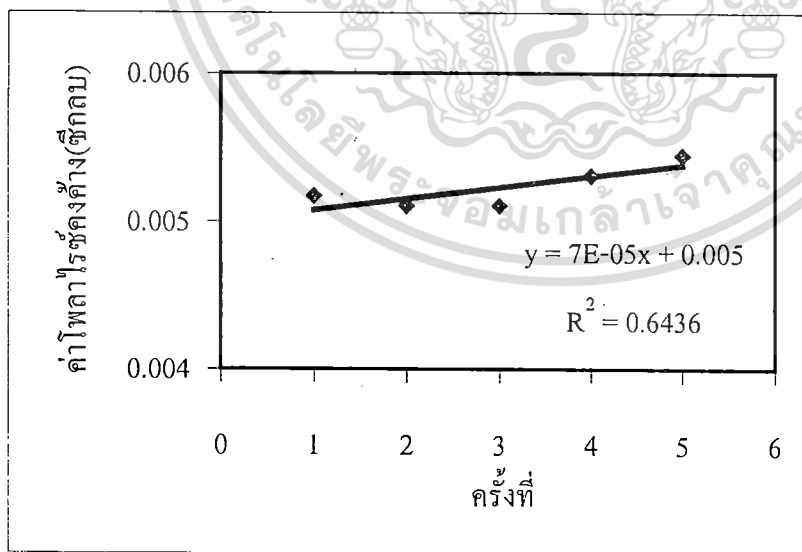


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	0.005
2	0.005
3	0.005
4	0.005
5	0.005

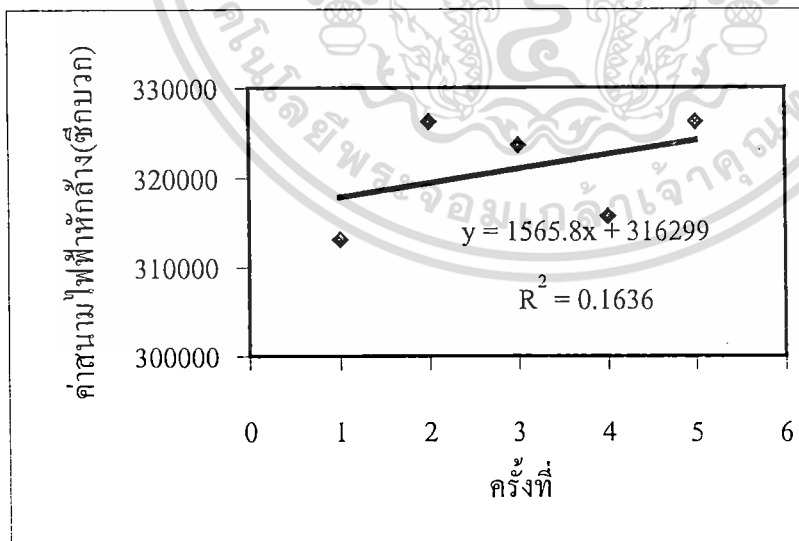


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	313167.260
2	326215.896
3	323606.168
4	315776.987
5	326215.896

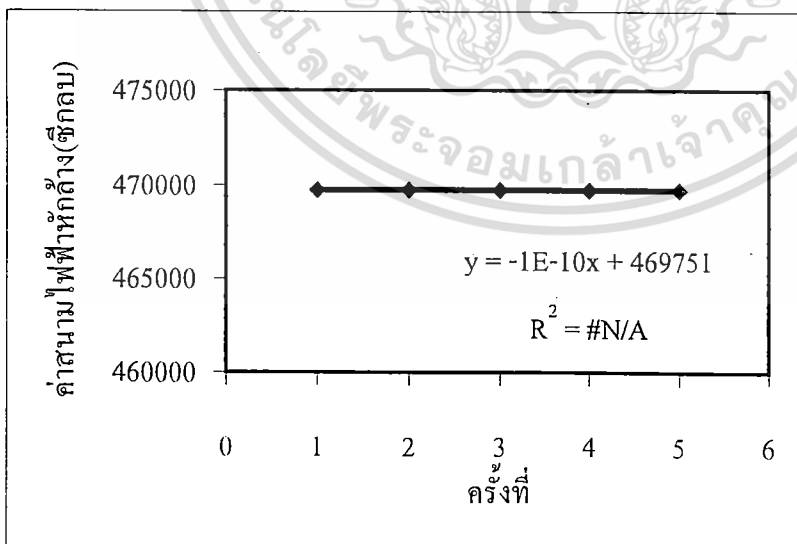


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)
1	469750.890
2	469750.890
3	469750.890
4	469750.890
5	469750.890

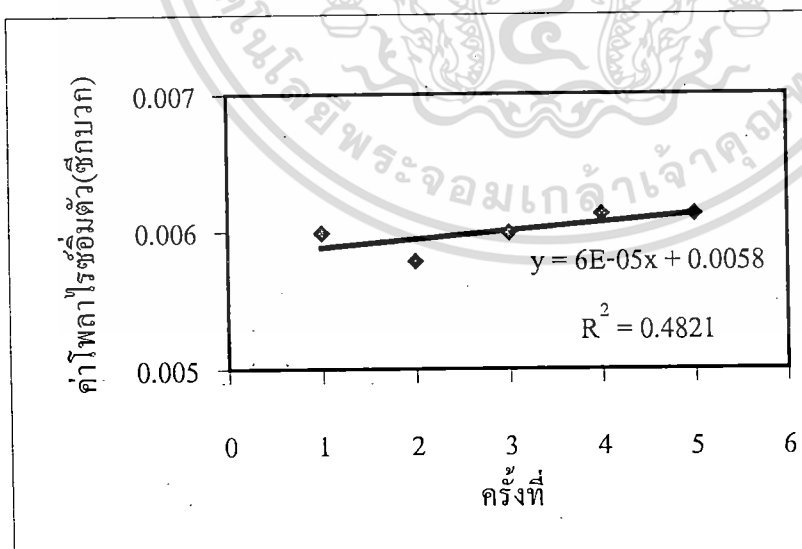


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)
1	0.006
2	0.006
3	0.006
4	0.006
5	0.006

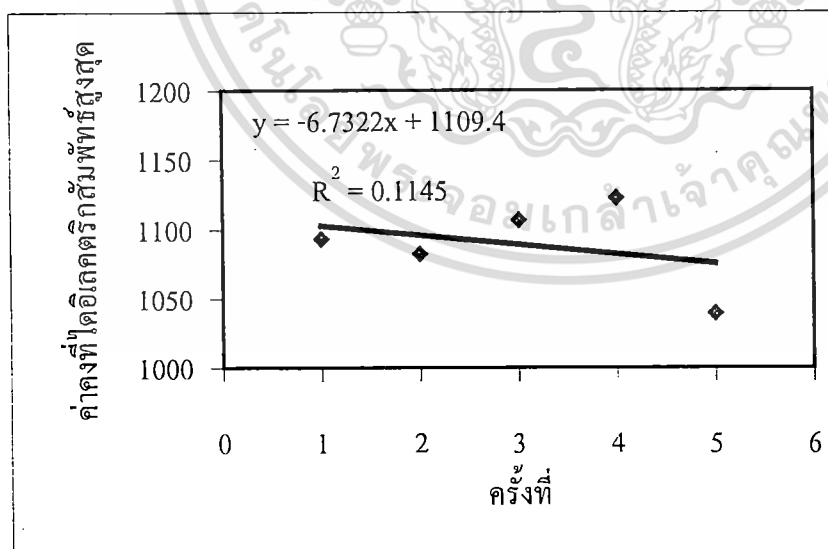


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 2: Ultrasonic transducer(SQ-40T)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	1093.532
2	1082.857
3	1106.787
4	1123.064
5	1039.767

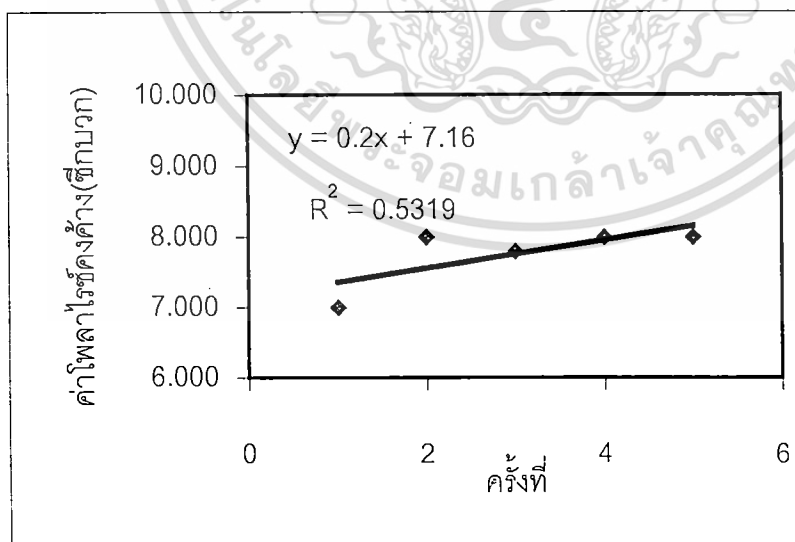


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)
1	7.000
2	8.000
3	7.800
4	8.000
5	8.000

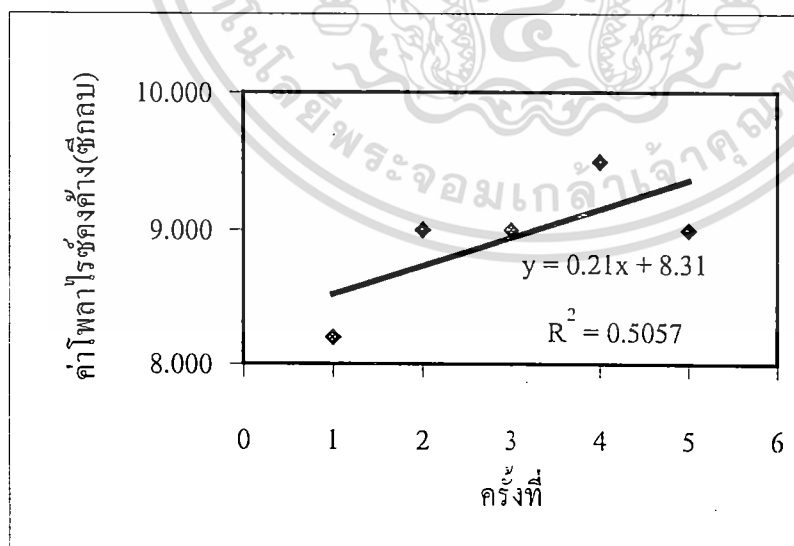


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกลบ)
1	8.200
2	9.000
3	9.000
4	9.500
5	9.000

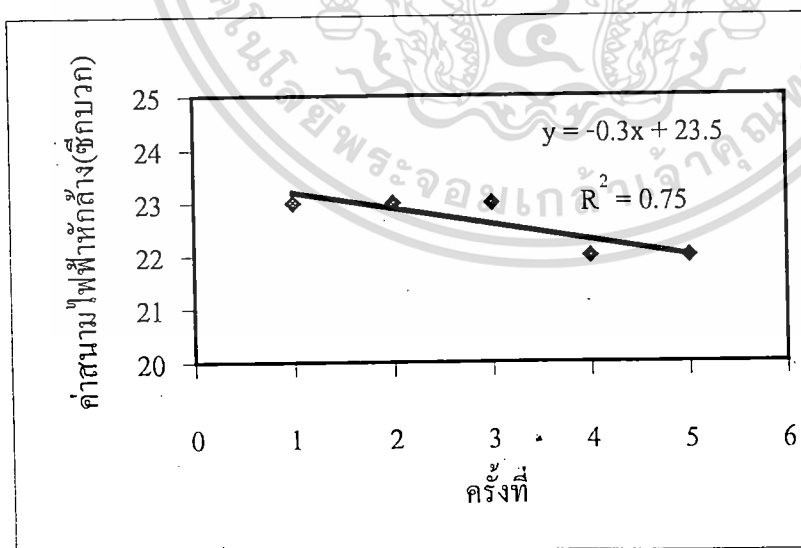


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวค)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปนสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวค)
1	23.000
2	23.000
3	23.000
4	22.000
5	22.000

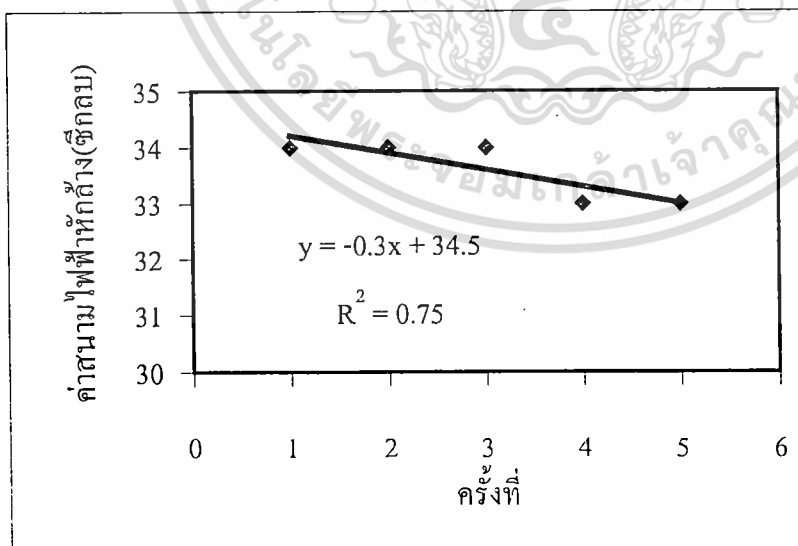


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกัลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกัลบ)
1	34.000
2	34.000
3	34.000
4	33.000
5	33.000

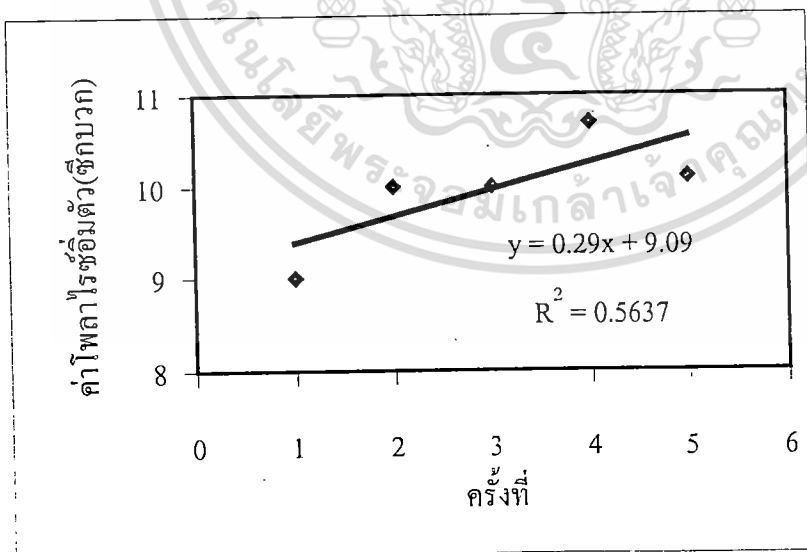


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซิกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซิกบวก)
1	9.000
2	10.000
3	10.000
4	10.700
5	10.100



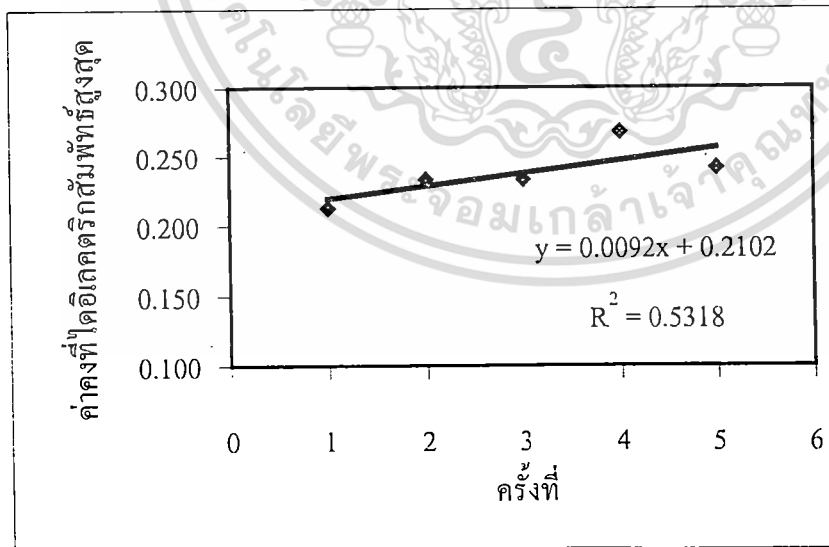
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 3: Ultrasonic transducer(SQ-40R)

ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	0.213
2	0.233
3	0.233
4	0.268
5	0.241

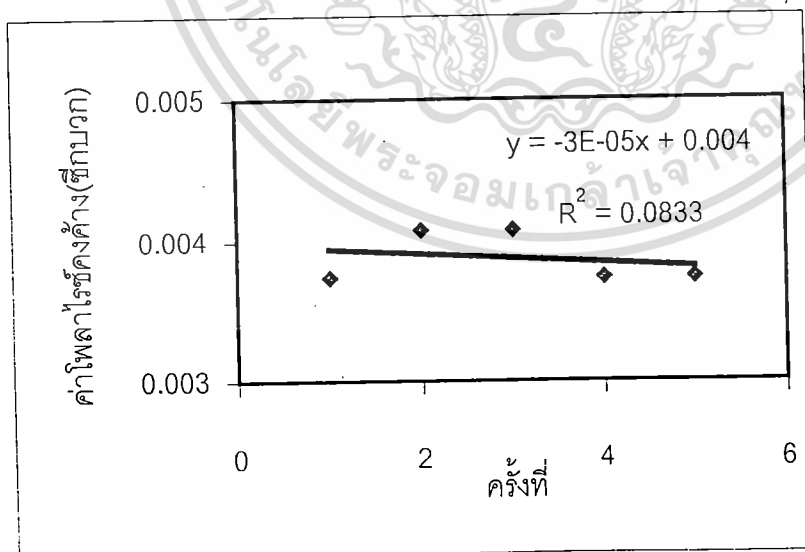


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์คงค้าง(ซีกบวก)
1	0.004
2	0.004
3	0.004
4	0.004
5	0.004

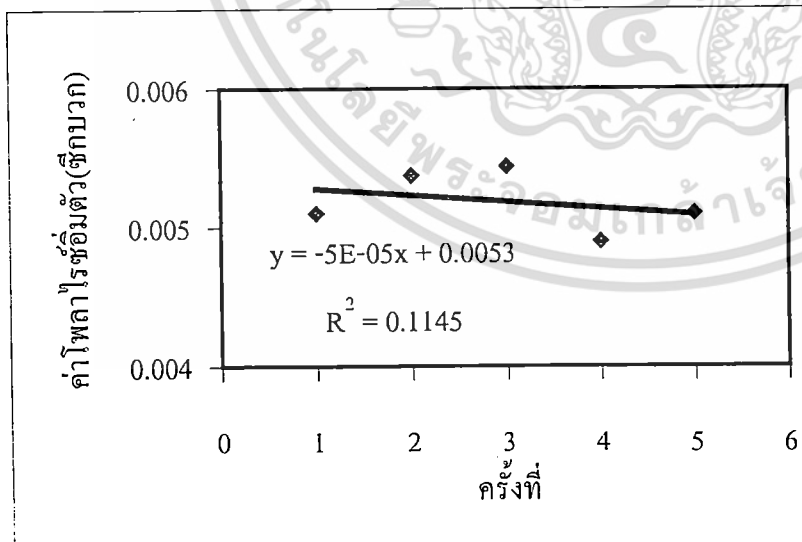


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาริซิมตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาริซิมตัว(ซีกบวก)
1	0.005
2	0.005
3	0.005
4	0.005
5	0.005

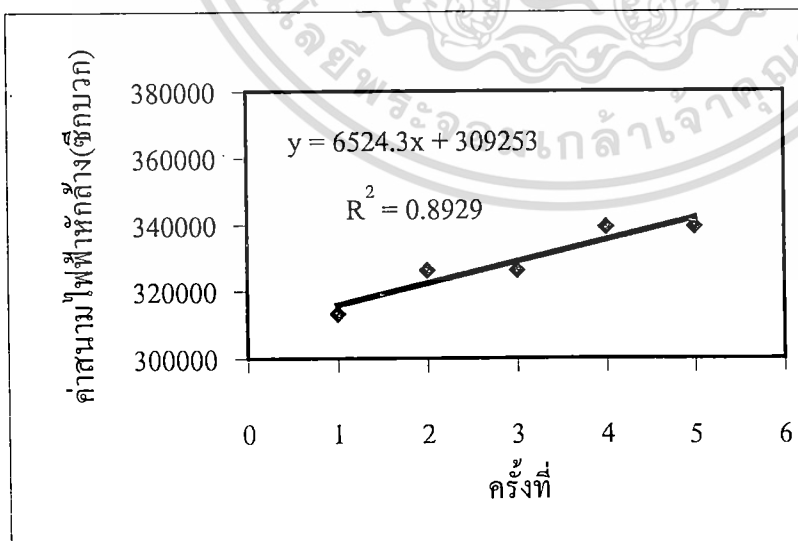


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกบวก)
1	313167.260
2	326215.896
3	326215.896
4	339264.531
5	339264.531

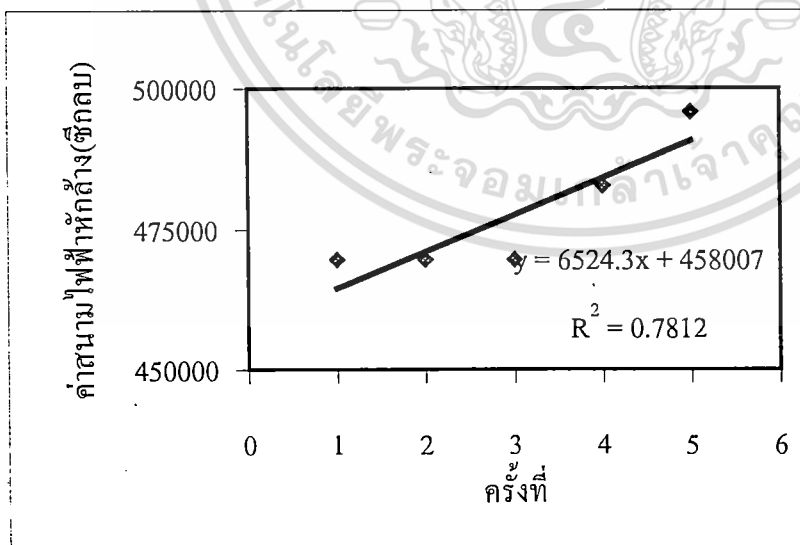


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง(ซีกลบ)
1	469750.890
2	469750.890
3	469750.890
4	482799.526
5	495848.161

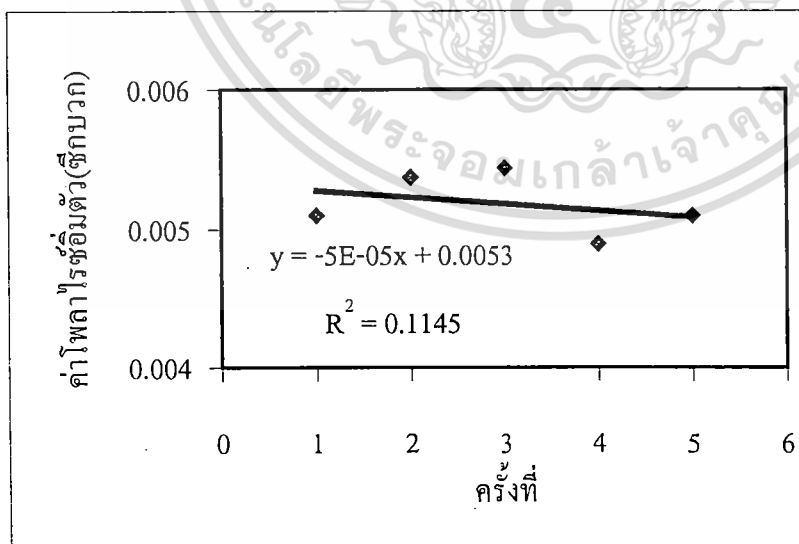


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)สำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงไปในสมการ

ครั้งที่	ค่าโพลาไรซ์อิมิตัว(ซีกบวก)
1	0.005
2	0.005
3	0.005
4	0.005
5	0.005

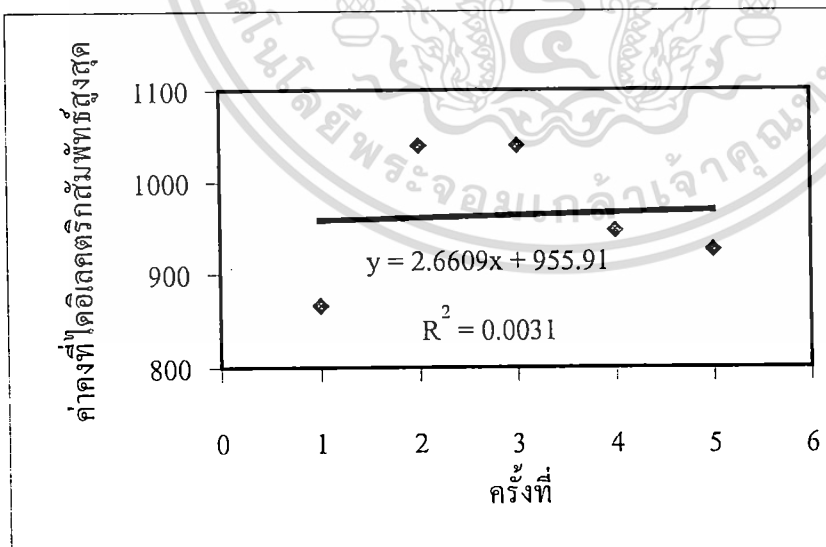


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบตัวที่ 4: Ultrasonic transducer(SQ-40R)		
ความหนาของวัสดุ	8.43E-04	เมตร
พื้นที่หน้าตัด	1.940E-03	ตารางเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุดสำหรับการวัดซ้ำ 5 ครั้ง
ค่าจริงที่ได้จากการแทนลงในสมการ

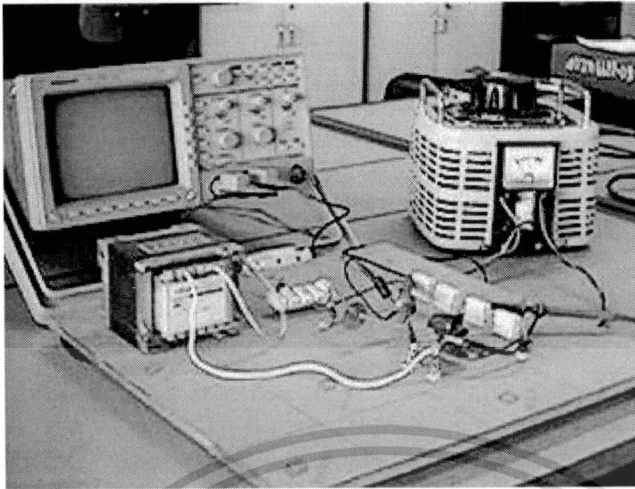
ครั้งที่	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงสุด
1	866.473
2	1039.767
3	1039.767
4	947.546
5	925.888



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ระบบเครื่องมือวัดคุณลักษณะสมบัติอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

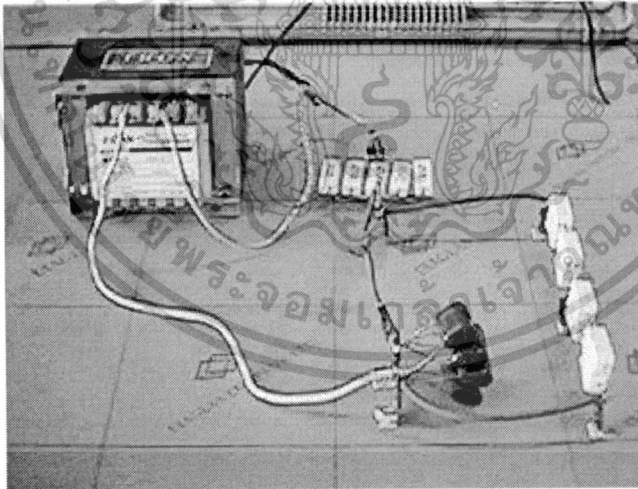


รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
(ซ้าย) ลำโพงบัสเซอร์(แบเรียมทิตาเนต)
(ขวา) อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

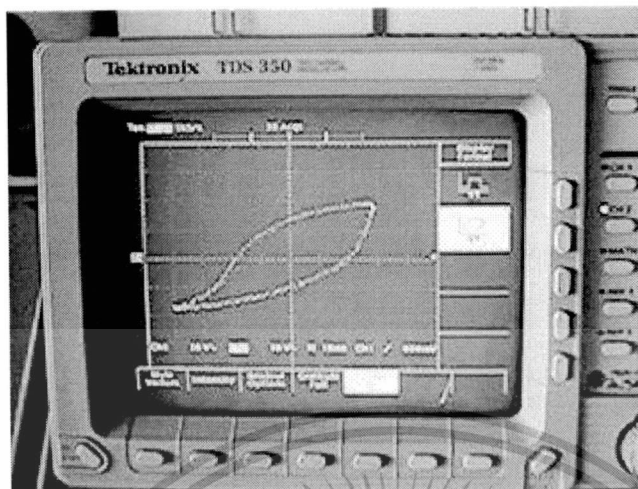


รูปที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเทียบขนาดกับเหรียญบาทเล็ก

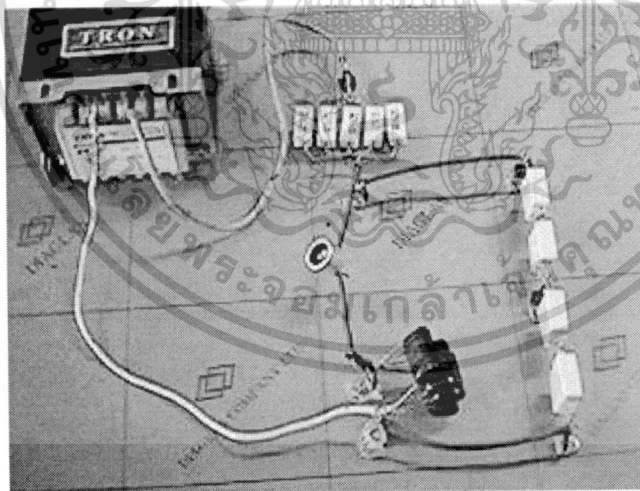


รูปที่ 4 วงจร Sawyer-Tower ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น
ซึ่งทดสอบกับลำโพงบัทเซอร์(แบเรียมทิตาเนต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

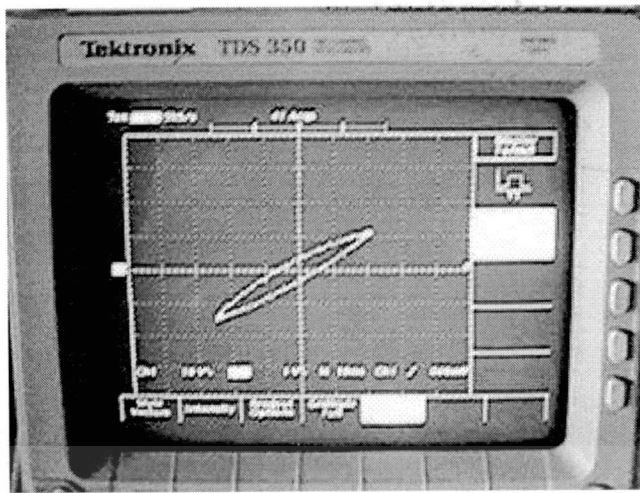


รูปที่ 5 ตัวอย่างฮิสเทอรีซิสลูปที่ได้จากการวัดลำโพงบัสเชอร์(แบบเรียบทิตานต)

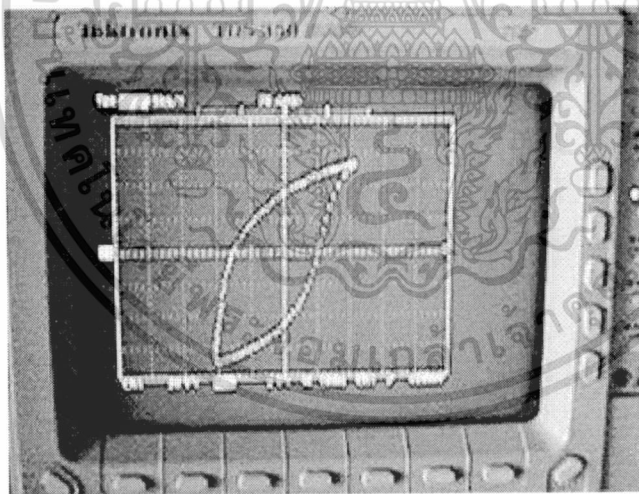


รูปที่ 6 วงจร Sawyer-Tower ซึ่งทดสอบกับอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 Minor Loop ฮิสเทอรีซิสของหัววัดอัลตราโซนิก



รูปที่ 8 ฮิสเทอรีซิสลูปของหัววัดอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- 1] Lerner, R.G. and Trigg, G.L., Encyclopeda of physics, 2ed., VCH publishers, NY,p.373-6(1991)
- [2] Berkens,M.M. and Kwaaitaal,Th.,"Spontaneous polarisation and transition temperature of a ferroelectric measured by a simple and accurate method,"J. Phys. E:Sci:Instrum.,Vol.16,p.516-21(1983)
- [3] Schmidt.,V.H.,"Ferroelectricity experiment for advanced laboratory",Am.J.Phys.,Vol.37,p351-4(1969)
- [4] Lines, M.E. and Glass, A.M., Principles and applications of ferroelectrics and related materials, Clarendon press oxford,p.102-5(1977)

