

ผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์สำหรับประยุกต์
ใช้ในงานแอกทูเอเตอร์

EFFECT OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC
RUBBER IN ACTUATOR APPLICATION

นภนันท บัญชู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์สำหรับ
ประยุกต์ใช้ในงานแอกทูเอเตอร์

นภนันท บัญชู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์
สำหรับประยุกต์ใช้ในงานแอกทูเอเตอร์

Effect of Electrical Properties of Synthetic Rubber in Actuator Application

ชื่อ - นามสกุล

นายณกันท์ บุญชู

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

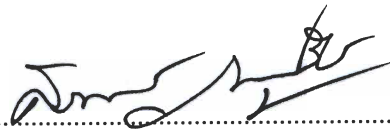
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สุนนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.

ปีการศึกษา

2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



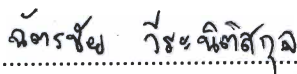
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)



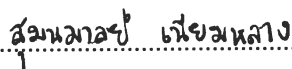
กรรมการ

(อาจารย์พิมลพรรณ เนียมกลาง, ปร.ด.)



กรรมการ

(อาจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์สุนนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์สำหรับ ประยุกต์ใช้ในงานแอกทูเอเตอร์
ชื่อ – นามสกุล	นายณภัจน์ท์ บุญชู
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุมนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมยางสังเคราะห์ทั้ง 7 ชนิด คือ ยางสไตรีนอะคริลิก (SAR) ยางอะคริลิก (AR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) ยางบิวตะไดอิน (BR) ยางไนไตร (NBR) ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (SIS) ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน-สไตรีน (SBS) สำหรับใช้ในงานแอกทูเอเตอร์.

การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกต่อการงอของชิ้นงานนั้นทำการศึกษาโดยนำชิ้นงานจุ่มในน้ำมันซิลิโคนระหว่างขั้วแผ่นทองแดง ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 0 – 1000 V/mm เมื่อกระตุ้นชิ้นงานด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ชิ้นงานเกิดการบิดงอช่วงปลายเข้าหาขั้วบวก และเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าพบว่าองศาการบิดงอของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และเมื่อขยับบิดงอจะเกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส โดยเมื่อค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิสที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก โมเลกุลของอีลาสโตเมอร์เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้น และขั้วลบของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นนั้น เกิดแรงดึงดูดกับขั้วบวกของอิเล็กโตรดทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงาน และเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้านั้นก็จะพบว่าไดโพลโมเมนต์ที่แข็งแกร่งกว่าเกิดขึ้น ทำให้เกิดแรงบิดงอที่สูงขึ้น และค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าถูกศึกษาในงานนี้ด้วย เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ค่ามอดูลัสสะสมสูงขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก เนื่องจากเกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นและเกิดพันธะทางไฟฟ้าระหว่างไดโพลโมเมนต์ จึงต้องใช้แรงบิดมากขึ้นในการทำให้ยางอีลาสโตเมอร์นี้เสียสภาพ.

ดังนั้นยางอีลาสโตเมอร์จะมีค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นและเกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิสขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานแอกทูเอเตอร์ได้ด้วยการควบคุมความเข้มสนามไฟฟ้าจากภายนอก.

คำสำคัญ: สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า ยางสังเคราะห์ สมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้า

Thesis Title	Effect of Electrical Properties of Synthetic Rubber in Actuator Application
Name - Surname	Mr. Nopanan Boonchu
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Miss Sumonman Niamlang, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

In this research 7 kinds of synthetic rubbers were used, as actuator materials such as styrene acrylic rubber (SAR), acrylic rubber (AR), styrene butadiene rubber (SBR), butadiene rubber (BR), nitrile rubber (NBR), styrene-isoprene-styrene rubber (SIS), and styrene-butadiene-styrene rubber (SBS).

The bending response was studied by dipping elastomer in silicone oil between copper electrode under electric field strength of 0 - 1,000 V/mm. When external electric field was applied the elastomer was bended toward cathode electrode and degree of bending increase with increasing electric field strength. The dielectrophoresis force (F_d) increases with increasing electric field strength. The dipole moments were generated and interacted with cathode electrode thus elastomer was bended toward cathode electrode. Higher electric field strength, stronger dipole moments were generated higher degree of bending was observed. The electromechanical response of elastomer was studied. When external electric field was applied, the storage modulus (G') of all elastomer increases due to the electrostatic bonding between generated dipole moments thus higher shear force was required to deform elastomer.

When external electric field is applied, the G' of elastomers increase and F_d of elastomers are generated. Thus these synthesis elastomers can be used in actuator applications under controlling electric field strength.

Keywords: mechanical properties, electrical properties, synthetic rubber, eletroresponsive properties

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการปริญญาานิพนธ์เรื่องผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ต่อสมบัติไฟฟ้าเชิงกลในการประยุกต์ใช้ในงานแอคทูเอเตอร์จัน โครงการสำเร็จตามวัตถุประสงค์นั้นทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์โดยตลอดที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ดร.ฉัตรชัย วีระนิติสกุล กรรมการการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้

นภนันท์ บุญชู



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	17
1.5 ประโยชน์ของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	48
3.2 วัสดุและอุปกรณ์.....	49
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.4 การทดลองการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ยางสไตรีนอะโครลิกและยางอะโครลิก.....	53

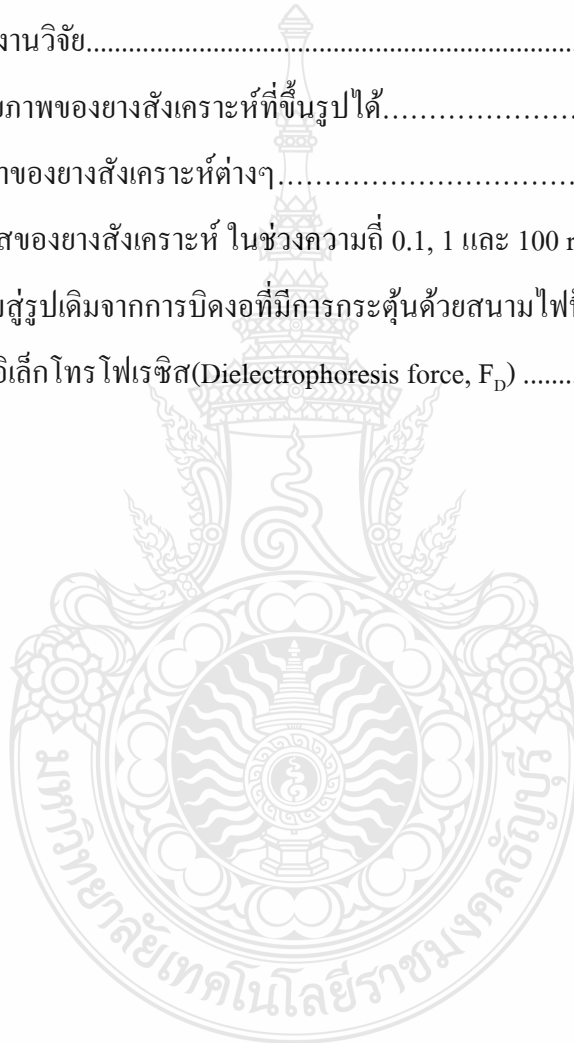
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การทดลองการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ยางสไตรีนบิวตะไดอิน.....	53
ยางบิวตะไดอิน ยางโครโรพรีน ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน	
3.6 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์.....	53
3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลทางไฟฟ้า.....	54
3.8 การวัดค่าความสามารถในการเก็บประจุ.....	55
3.8 การคำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส.....	56
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้.....	57
4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์.....	58
4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางสังเคราะห์ในระบบที่มี.....	61
และไม่มีกระแสด้วยสนามไฟฟ้า	
4.4 การบิดงอของยางสังเคราะห์เมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า.....	64
กระแสตรงจากภายนอก	
4.5 ผลการคำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force, F_D).....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม.....	92
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	96



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง.....	35
ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่างๆ.....	39
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.....	48
ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้.....	57
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ต่างๆ.....	59
ตารางที่ 4.3 แสดงค่ามอดูลัสของยางสังเคราะห์ ในช่วงความถี่ 0.1, 1 และ 100 rad/s	63
ตารางที่ 4.4 เวลาในการกลับสู่รูปเดิมจากการบิดงอที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก.....	65
ตารางที่ 4.5 จำนวนแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส(Dielectrophoresis force, F_D)	76



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของ แอคทูเอเตอร์ และ เซนเซอร์	20
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโลหะจำรูป.....	21
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิ.....	22
รูปที่ 2.4 Hysteresis curve ของโลหะจำรูปโดยสัดส่วนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์.....	22
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนโครงสร้างของ Nitinol จากโครงสร้างแบบ BCC กล่องด้านซ้าย ไปเป็น..... โครงสร้างแบบ Tetragonal ทางด้านขวาและขนาด Lattice Parameterเมื่อเทียบกล่อง ด้านซ้ายและด้านขวา	23
รูปที่ 2.6 การเติบโตของ Variant ในโครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์.....	24
รูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์การจดจำรูป (Shape Memory Effect).....	25
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะจำรูป One way shape memory effect และ..... Two way shape memory effect	26
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของการแบ่งโครงสร้างของผลึก.....	28
รูปที่ 2.10 แสดงปรากฏการณ์ Piezoelectricity.....	28
รูปที่ 2.11 แสดงการ Poling of Piezoelectric Ceramics.....	29
รูปที่ 2.12 เทคนิคการสร้าง Thin Film Magnetostriction.....	30
รูปที่ 2.13 กระจกเคลือบที่แบบไม่มีทิศทางแบบสุ่มทำให้ไม่มีกระแสสุทธิ.....	31
รูปที่ 2.14 แสดงกระแสของประจุไฟฟ้าเมื่อมีสนามไฟฟ้า.....	31
รูปที่ 2.15 อิเล็กตรอนและหลุมในโครงสร้างของซิลิกอน.....	32
รูปที่ 2.16 สารกึ่งตัวนำประเภท N สารกึ่งตัวนำประเภท P	33
รูปที่ 2.17 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบExtrinsic.....	33
รูปที่ 2.18 แสดงแถบพลังงานของ วัสดุฉนวนไฟฟ้า วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า วัสดุตัวนำ..... ไฟฟ้า	34

สารบัญรูป (ต่อ)

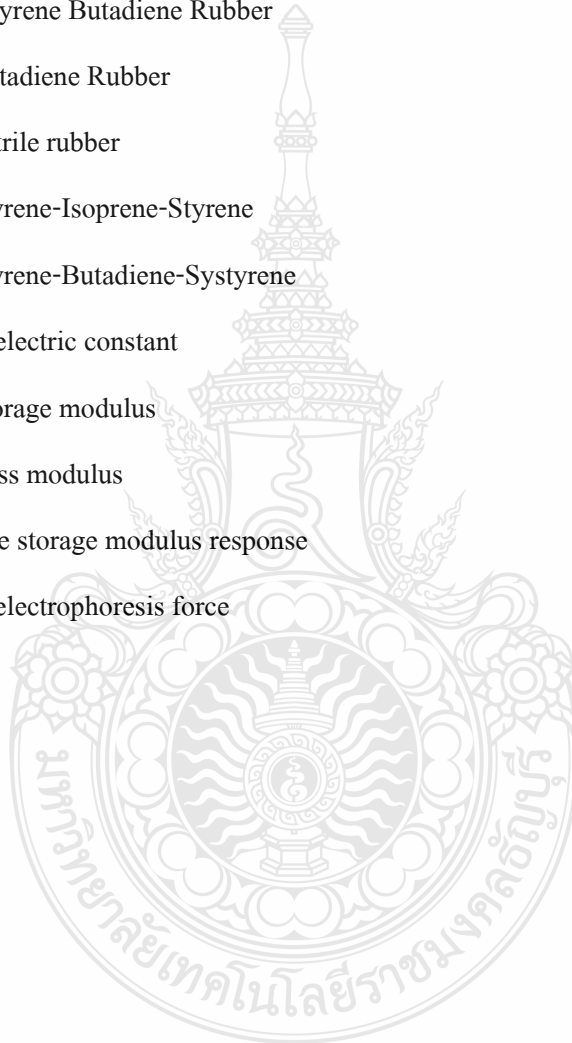
	หน้า
รูปที่ 2.19 พฤติกรรมค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและโลหะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ... ..	36
รูปที่ 2.20 Dielectrics in Electric Fields - Polarization	37
รูปที่ 2.21 Material Polarization and Surface Charge Densitie.....	38
รูปที่ 2.22 Parallel Plat Rheometer (Rheometric scientific Inc,ARES).....	40
รูปที่ 2.23 การตอบสนองต่อความเครียดวัสดุและความเค้น.....	41
รูปที่ 2.24 ยางบิวตาไดอิน (Butadiene Rubber, BR)	42
รูปที่ 2.25 ยางสไตรีนบิวตาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)	42
รูปที่ 2.26 ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR)	43
รูปที่ 2.27 ยางสไตรีน-บิวทสไดอิน-สไตรีน (Styrene- Butadiene- Systyrene, SBS).....	44
รูปที่ 2.28 ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene,SIS).....	44
รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงค่าสตอเรจมอดุลัสเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกของ..... พอลิเมอร์ผสมพอลิพาราฟินิลีน ไวนิลีนและพอลิไดเมทิลไซลอคเซน	45
รูปที่ 3.1 การวัดการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า.....	52
รูปที่ 3.2 เครื่อง Parallel Plate Rheometer	53
รูปที่ 3.3 การวัดค่าการความสามารถในการเก็บประจุ.....	54
รูปที่ 4.1 ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ของยางธรรมชาติสังเคราะห์..... ในระบบที่ไม่มีมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 0 V/mm	61
รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ของยางธรรมชาติสังเคราะห์..... ในระบบที่ไม่มีมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 1500 V/mm	62
รูปที่ 4.3 ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์..... ในระบบที่ไม่มีมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 0 V/mm	63
รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์..... ในระบบที่ไม่มีมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 15000 V/mm	64
รูปที่ 4.5 ค่าผลต่างของมอดุลัสสะสม (Storage modulus) ของยางสังเคราะห์.....	65
รูปที่ 4.6 แสดงการบิดงอของยางสังเคราะห์.....	65
รูปที่ 4.7 องค์การการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SAR	66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ AR	66
รูปที่ 4.9 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SBR	67
รูปที่ 4.10 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ BR	67
รูปที่ 4.11 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SBS	68
รูปที่ 4.12 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SIS14%	68
รูปที่ 4.13 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SIS17%	69
รูปที่ 4.14 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SIS122%	69
รูปที่ 4.15 อองศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก..... ต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ชนิดต่าง	70
รูปที่ 4.16 แรงไดอิเล็กทริกโพรโพเรซิส ของยางสังเคราะห์.....	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SAR	Styrene Acrylic Rubber
AR	Acrylic Rubber
SBR	Styrene Butadiene Rubber
BR	Butadiene Rubber
NBR	Nitrile rubber
SBS	Styrene-Isoprene-Styrene
SIS	Styrene-Butadiene-Systyrene
ϵ'	Dielectric constant
G'	Storage modulus
G''	Loss modulus
$\Delta G'$	The storage modulus response
F_D	Dielectrophoresis force



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

วัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า (Electroactive material) เป็นวัสดุที่ตอบสนองและปรับสมบัติได้ เมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก พอลิเมอร์ที่ตอบสนองทางไฟฟ้า (Electroactive polymers, EAPs) เป็นอีกวัสดุตอบสนองไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งที่ถูกนำไปใช้ทั้งในงานเซนเซอร์ (Sensor) และทรานสดิวเซอร์ (Transducers) โดยเซนเซอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับ (Monitoring) การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความร้อน การนำไฟฟ้า หรือ สี เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมหรือสมบัติ ในขณะที่ทรานสดิวเซอร์นั้นเป็นการแปลงพลังงานจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง เช่น กล้ามเนื้อเทียม ระบบนำส่งยา หรือแม้กระทั่งแขนจักรกล โดยทั่วไป EAPs จะถูกนำไปใช้เป็นแอกทูเอเตอร์ (Actuator) ซึ่งแอกทูเอเตอร์ (Actuator) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานภายนอกที่กระตุ้นเข้าไปเป็นพลังงานกล เมื่อมีการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น สนามไฟฟ้า หรือ สนามแม่เหล็ก แต่ตัวกระตุ้นที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า เนื่องจากสามารถควบคุมได้ง่ายและสามารถสร้างเครื่องมือปล่อยสนามไฟฟ้าได้สะดวก โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกนั้นสมบัติเชิงกล เช่น ความเครียด ความเค้น จะเปลี่ยนไป จากจุดเด่นเหล่านี้เองจึงมีการประยุกต์ใช้แอกทูเอเตอร์ที่ทำมาจาก พอลิเมอร์ที่ตอบสนองทางไฟฟ้า ในงานหุ่นยนต์ชีวภาพ (Bionics) กล้ามเนื้อเทียม (Artificial muscle) ไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) อีกจุดเด่นหนึ่งของพอลิเมอร์ตอบสนองทางไฟฟ้า คือ มีน้ำหนักเบา มียืดหยุ่นสูง มีความเหนียว สามารถขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ ได้ และราคาไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับสารอนินทรีย์อื่นๆ พอลิเมอร์ที่มีสมบัติตอบสนองทางไฟฟ้ามีหลายประเภท ได้แก่ อีลาสโตเมอร์ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ไอออนิกเจล ไฮโดรเจล

ปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมนั้นก้าวหน้ามาก ระบบการผลิตเน้นความแม่นยำ และ ความรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแขนจักรกลซึ่งเป็นแอกทูเอเตอร์ชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในทศวรรษนี้ โดยวัสดุที่ใช้เป็นแขนจักรกลอุตสาหกรรมนั้นโดยมากทำมาจากโลหะ หรือ โลหะผสม ซึ่งมีข้อจำกัดในสมบัติการยืดหยุ่น ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุฉลาด (Smart Material) ในงานแขนจักรกลอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยวัสดุฉลาด (Smart material) ที่นิยมกันได้แก่ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งเป็นวัสดุพวกเซรามิก ที่มีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อได้รับแรงกล (Mechanical force) จะให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง เกิด

แรงกลซึ่งโดยเรียกว่า ปรากฏการณ์นี้ว่า อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse piezoelectric effect) สมบัติเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ได้แก่ เลดเซอร์โคเนียมไททานเนต (Lead zirconia titanate เลดไททานเนต เซอร์โคเนต (Lead titanate zirconate) และแบเรียมไททานเนต (Barium titanate) แต่เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนัก และสมบัติการยืดหยุ่น ทำให้วัสดุพวกอิลาสโตเมอร์ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น เป็นทางเลือกใหม่สำหรับเป็นวัสดุสำหรับผลิตเซนเซอร์กล โดยกลไกการทำงานเพื่อเป็นเซนเซอร์กลนั้นแตกต่างจากวัสดุอื่นโดยสิ้นเชิง เนื่องจากวัสดุอื่นนั้นมีสมบัติเป็นของแข็ง ทำให้ขาดความยืดหยุ่น และยากต่อการเคลื่อนที่ระยะแคบหรือการเคลื่อนที่แบบโค้งแต่อิลาสโตเมอร์นั้นมีสมบัติความยืดหยุ่นสูงทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการเคลื่อนที่แบบโค้งได้ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบขงสังเคราะห์ซึ่งเป็นอิลาสโตเมอร์ชนิดหนึ่งเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์กลอุตสาหกรรมที่สามารถควบคุมได้ด้วยไฟฟ้า

กลไกการทำงานสำหรับอิลาสโตเมอร์ในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอก คือ เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก โมเลกุลของยางอิลาสโตเมอร์จะเกิดปรากฏการณ์พอลาไรซ์เซชันเหนี่ยวนำทำให้เกิดการไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) และเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น ความเครียดและความเค้นของวัสดุเปลี่ยนไป โดยสังเกตได้จากการบิดงอของยางสังเคราะห์และความแข็งแรงของวัสดุ ในงานวิจัยนี้สนใจ อิลาสโตเมอร์ 7 ชนิด คือ ยางสไตรีนอะคริลิก (Styrene Acrylic rubber,SAR) ยางอะคริลิก (Acrylic rubber,AR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene rubber,SBR) ยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber,BR) ยางไนไตร (Nitrile rubber,NBR) ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene,SIS) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน และศึกษาสมบัติการตอบสนองเชิงกลไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ทั้งสองเพื่อที่จะเป็นวัสดุทางเลือก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ที่มีสูตรโครงสร้างที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างๆ สำหรับใช้เป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า สำหรับขึ้นรูปแขนจักรกลตอบสนองทางไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการตอบสนองเชิงไฟฟ้าทางกลของยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความแรงของสนามไฟฟ้า ชนิดของยางสังเคราะห์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางสังเคราะห์ ค่าการนำไฟฟ้าของยางสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สามารถขึ้นรูป ยางสังเคราะห์ 7 ชนิด คือ ยางสไตรีนอะคริลิก (Styrene Acrylic rubber, SAR) ยางอะคริลิก (Acrylic rubber, AR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene rubber, SBR) ยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber, BR) ยางไนไตร (Nitrile rubber, NBR) ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene, SIS) ยางสไตรีน-บิวทสไดอิน-สไตรีน (Styrene-Butadiene- Styrene, SBS)

1.3.2 การตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้ ที่ความต่างศักย์ 0-1500V/mm

1.3.3 ศึกษาหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant), ความจุไฟฟ้า (Capacitance), แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force) มอดูลัสสะสม (Storage modulus) มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์ทั้งที่มีและไม่มีกาวเหนียวจากสนามไฟฟ้าภายนอก

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ในงานวิจัย

1.4.3 เตรียมขึ้นรูปยางสังเคราะห์ ทั้ง 7 ชนิด คือ ชนิด ยางสไตรีนอะคริลิก (Styrene Acrylic rubber, SAR) ยางอะคริลิก (Acrylic rubber, AR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene rubber, SBR) ยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber, BR) ยางไนไตร (Nitrile rubber, NBR) ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene, SIS) ยางสไตรีน-บิวทสไดอิน-สไตรีน (Styrene-Butadiene- Styrene, SBS)

1.4.4 ทำการวิเคราะห์สมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้า ของ ยางสังเคราะห์ ทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ การวัดค่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant), ความจุไฟฟ้า (Capacitance), แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force), มอดูลัสสะสม (Storage modulus), มอดูลัสสูญเสีย (Loss Modulus) ของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้ทั้งที่มีและไม่มีกาวเหนียวจากสนามไฟฟ้าภายนอก

1.5 ประโยชน์ของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เชิงทฤษฎี

สามารถบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเตรียมยางสังเคราะห์และความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงไฟฟ้าทางกลของยางสังเคราะห์ กับความแรงของสนามไฟฟ้า โครงสร้างทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้า และได้ทราบกลไกการตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าของยางสังเคราะห์เพื่อที่จะนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรม

1.5.2 เชิงประยุกต์

สามารถพัฒนายางสังเคราะห์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลาย ได้แก่ กล้ามเนื้อเทียม แขนจักรกลอุตสาหกรรม เป็นต้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

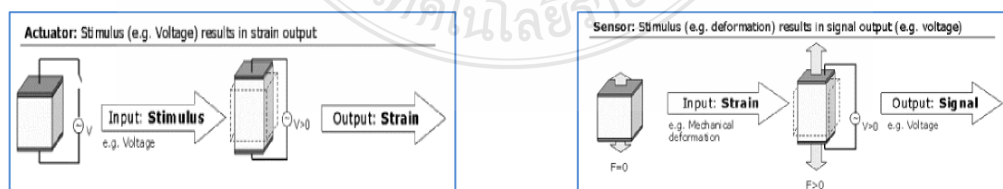
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า (Electroactive material)

วัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า คือ วัสดุที่สมบัติเปลี่ยนไปเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างกว้างขวางโดยมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ไม่ว่าจะเป็นความเค้น หรือความเครียด ตัวอย่างวัสดุตอบสนองต่อไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electroc ceramic) เซนเซอร์ ไดโอดอินทรีย์ (Organics Diodes) แม่เหล็ก อุปกรณ์แสง และ โฟโตเรซิส (Photoresis) [1]

2.1.2 แอคทูเอเตอร์ (Actuator)

แอคทูเอเตอร์ คือ ส่วนที่มีหน้าที่ตอบสนองและปรับเปลี่ยนรูปร่าง ตำแหน่ง ความถี่ธรรมชาติ หรือลักษณะเฉพาะทางกลอื่นๆ เพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า และหรือสนามแม่เหล็ก โดยแอคทูเอเตอร์จะนำสัญญาณจากเซ็นเซอร์มาตอบสนองในรูปของการเคลื่อนที่ เซ็นเซอร์และแอคทูเอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับระบบการทำงานของวัสดุฉลาด (Smart materials) ซึ่งวัสดุนี้สามารถแสดงความสามารถในการทำงานออกมาได้หลากหลายแบบ เช่น การปรับระดับแสงและอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศควบคุมการเปิดและปิดไฟโดยใช้เสียง การซ่อมแซมตัวเองของสะพานเมื่อเกิดความเสียหายและหุ่นยนต์ที่มีการทำงานคล้ายมนุษย์ เป็นต้น [2]



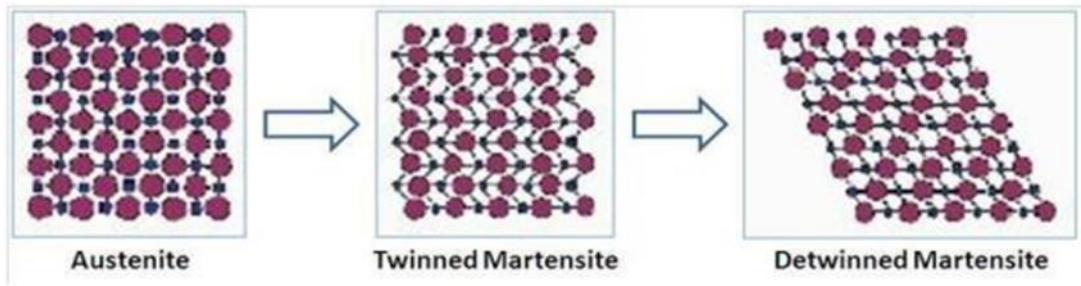
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของ แอคทูเอเตอร์ และ เซนเซอร์ [2]

2.1.3 วัสดุสำหรับใช้เป็นแอกทูเอเตอร์

2.1.3.1 โลหะผสมจำรูป (Shape memory alloys) [3]

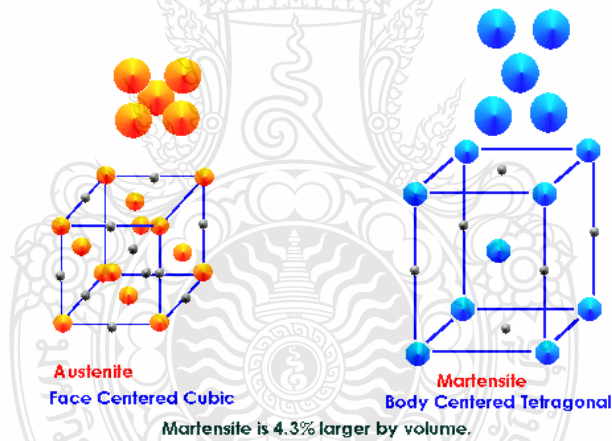
โลหะผสมจำรูป (Shape memory alloys) คือโลหะจำรูปที่มีสมบัติในการคืนรูปภายหลังได้รับแรงกระทำทางกลจนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่เหมาะสม โดยในปี ค.ศ. 1951 Chang และ Read ค้นพบโลหะที่มีสมบัติการคืนรูปได้ เมื่อโลหะกลุ่มนี้ถูกเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจะสามารถคืนกลับรูปเดิมได้เมื่อได้รับความร้อนที่เหมาะสม ความสามารถในการจำรูปนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของโลหะ ซึ่งโลหะที่ใช้ในการทดลองคือโลหะผสมทองคำแคดเมียม (AuCd) การพัฒนาต่อมาในต้นปีที่ 1960 โดยกองทัพสหรัฐอเมริกาเพื่อใช้ในกิจการอวกาศแห่งชาติอเมริกา (NASA) โดยใช้ชื่อว่า Nitinol เป็นการผสมระหว่างชื่อของโลหะ 2 ชนิด คือ นิกเกิล (Nickel, Ni) ไทเทเนียม (Titanium, Ti) ต่อมาในปี ค.ศ. 1964 Buehler และคณะได้ค้นพบโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียม (NiTi) และโลหะจำรูปคือโลหะที่มีโครงสร้างผลึกอย่างน้อย 2 โครงสร้าง ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงรูปจากโครงสร้างหนึ่งเป็นอีกโครงสร้างได้โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ทำให้โลหะชนิดนี้มีสมบัติสมภาพยืดหยุ่นยิ่งยวด (Super elasticity) และปรากฏการณ์การจดจำรูปร่าง (Shape memory effect)

ปัจจัยสำคัญที่ใช้อธิบายกลไกการจำรูป คือ โครงสร้างของโลหะจำรูป ซึ่งประกอบด้วย 2 โครงสร้างหลัก คือ โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงและ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) โครงสร้างที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้น (Martensitic transformation) เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้โลหะจำรูปสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ ในโลหะ จำรูปจะเกิด โครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic) ที่อุณหภูมิอุณหภูมิลดลงและเกิดการคายความร้อนออก โครงสร้างของโลหะจำรูปจะเปลี่ยนเป็น โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดค้ำหนึแบบทวิน (Twinned Martensite) และมีโครงสร้างผลึกแบบ โมโนคลินิก (Monoclinic) ซึ่งเมื่อออกแรงกระทำกับโครงสร้างที่เป็น โครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์จะทำให้โครงสร้างยืดออกกลายเป็นโครงสร้างดีทวินมาร์เทนไซต์ (Detwinned martensite) ดังแสดงในรูป 2.2

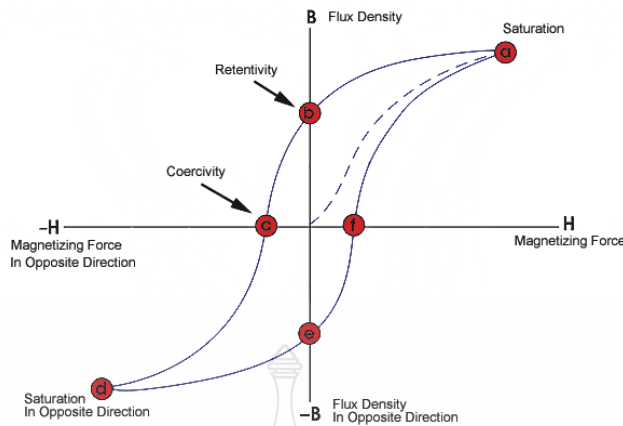


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโลหะจำรูป [3]

เมื่อลดอุณหภูมิโดยไม่อาศัยแรงทางกลจะส่งผลให้โครงสร้างออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ (Reverse martensitic transformation) หากให้ความร้อนกับโครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนกลับไปเป็นออสเทนไนต์ได้เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.3



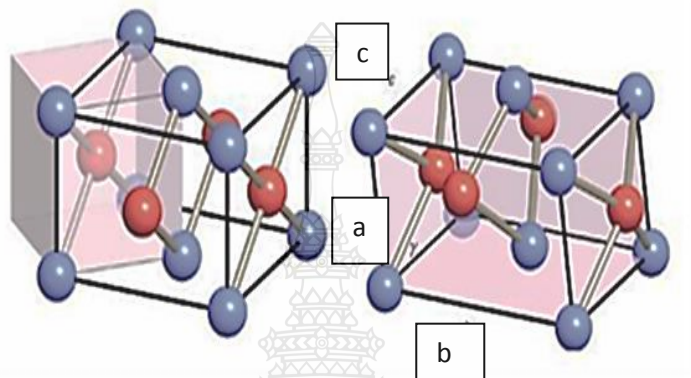
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิ [3]



รูปที่ 2.4 Hysteresis curve ของโลหะจำรูปโดยสัดส่วนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ [3]

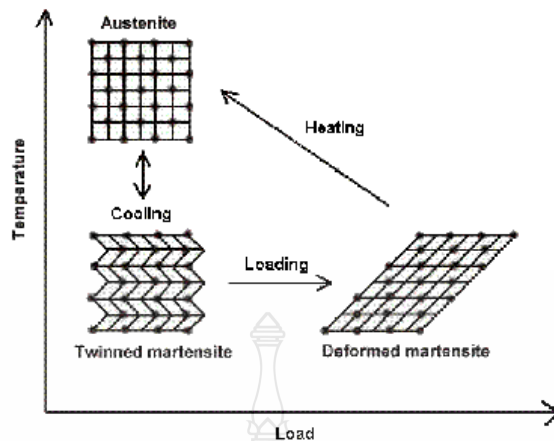
การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระหว่างออสเทนไนต์กับมาร์เทนไซต์ได้โดยการใช้กราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis curve) ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนโครงสร้างของโลหะ จำรูปได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะพบว่าวัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปกลับมาได้เรื่อยๆหากไม่ใช้งานโลหะจำรูปที่อุณหภูมิสูงเกินไปและอุณหภูมิระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับนั้นมีอุณหภูมิต่างกันเพียง 10 ถึง 50°C เท่านั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะจำรูปการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์นั้น (Martensitic transformation) เป็นกลไกสำคัญของสมบัติจำรูปจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะจำรูปจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์นั้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วจนไม่ต้องอาศัยการแพร่ (Diffusion less transformation) ของอะตอมแต่อาศัยการเคลื่อนที่ของอะตอมไปพร้อมกัน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วนั้น ทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ไปได้เล็กน้อย ซึ่งอาจน้อยกว่าขนาดของ Lattice parameter อีกด้วย โดยปกติขณะที่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากออสเทนไนต์ที่มีความสมมาตรของโครงสร้างสูงกลายเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความสมมาตรต่ำนั้น จะต้องเกิดการยืดออกเพื่อลดพลังงานในระบบ (Strain energy) แต่เนื่องจากการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นได้รวดเร็วมมากและเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ใช้การแพร่ ดังนั้นขนาดของ Lattice parameter จึงเปลี่ยนไปได้เล็กน้อย ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนขึ้นในโครงสร้างของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่ในระบบโครงสร้างต้องการลดพลังงานดังกล่าวลงจึงเกิดตำหนิแบบทวินขึ้นทำให้ได้โครงสร้างเพื่อทำให้ขนาดของ Lattice parameter เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ Nitinol ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิ

สูง Nitinol จะมีโครงสร้างแบบ BCC (กล่องด้านซ้าย) และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะเปลี่ยนเป็น โครงสร้างแบบ Tetragonal (กล่องด้านขวา) ซึ่งพบว่าโครงสร้าง Tetragonal มีขนาดของ Lattice parameter เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับกล่องด้านซ้ายมือ



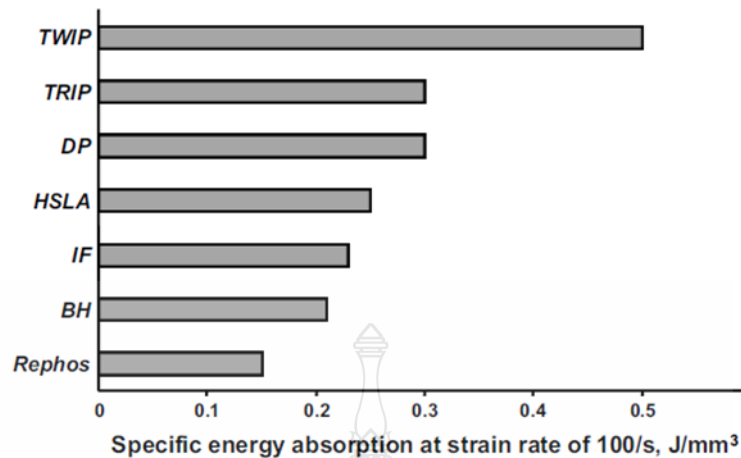
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนโครงสร้างของ Nitinol จากโครงสร้างแบบ BCC กล่องด้านซ้าย ไปเป็น โครงสร้างแบบ Tetragonal ทางด้านขวาและขนาด Lattice parameter เมื่อเทียบกับกล่องด้านซ้ายและด้านขวา [4]

จากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยไม่อาศัยการแพร่ทำให้เกิดโครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์ขึ้น โดยโครงสร้างดังกล่าวจะประกอบไปด้วย Variant ของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นจากการเรียงตัวของแผ่นมาร์เทนไซต์ในทิศทางที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 Variant จะออกแรงกระทำกับโครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์นั้นจะเกิดการยึดออก ทำให้เกิดโครงสร้างดีทวินมาร์เทนไซต์ขึ้นเนื่องมาจาก Variant เกิดการเคลื่อนที่และเติบโตขึ้น โดยทิศทางของแรงกระทำนั้นจะส่งผลต่อการเติบโตของ Variant หากแรงที่กระทำมีทิศทางเดียวกับทิศทางที่ Variant ใดวางตัวอยู่ Variant นั้นก็จะเกิดการเติบโตขึ้นได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะเติบโตได้ดีหากได้รับแรงกด กลไกที่เกิดขึ้นนั้นนอกจากจะช่วยทำให้เกิดโครงสร้างแบบดีทวินมาร์เทนไซต์ขึ้นแล้วยังส่งผลต่อความสามารถในการคืนกลับไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์หากได้รับความร้อนอีกด้วย



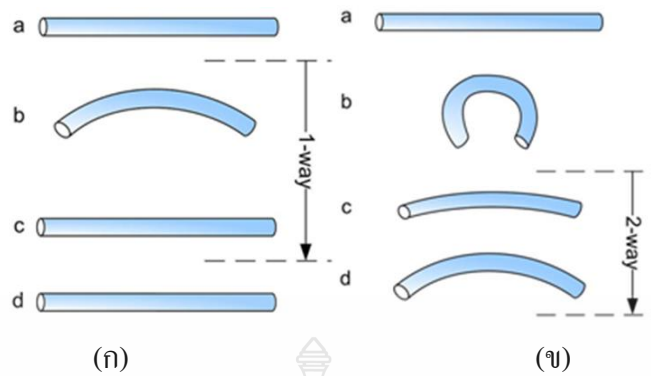
รูปที่ 2.6 การเติบโตของ Variant ในโครงสร้างทวินมาร์เทนไซต์ เมื่อได้รับแรงกระทำต่างกัน [5]

จากปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.7 จะพบว่าจากตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 2 เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างจาก ออสเทนไนต์ เป็น มาร์เทนไซต์ โดยการลดอุณหภูมิซึ่งในโครงสร้างแสดงให้เห็นว่าขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักและโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นยังมี Variant เกิดขึ้นในหลายทิศทางซึ่งเรียกโครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้ว่า ทวินมาร์เทนไซต์ จากนั้นเมื่อให้แรงภายนอกกระทำกับโลหะจํารูปจากตำแหน่งที่ 2 ไปตำแหน่งที่ 3 พบว่า Variant เกิดการเคลื่อนที่และเติบโตขึ้นเมื่อออกแรงดึงโลหะจํารูป Variant A สามารถเกิดการเติบโตได้ดีกว่า Variant ชนิดอื่น เนื่องจากวางตัวอยู่แนวเดียวกับทิศทางการรับแรงส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่เรียกว่า ดิทวินมาร์เทนไซต์ ขึ้นโดยมี Variant A เป็นหลักและเมื่อคลายความเค้นออกจากตำแหน่งที่ 3 ไปตำแหน่งที่ 4 โลหะจํารูปจะคงโครงสร้างนี้ไว้และเมื่อได้รับความร้อนก็จะสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ได้อีกซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์การจดจํารูปร่าง (Shape Memory Effect)



รูปที่ 2.7 ปราบกฎการจลการจจจรูป (Shape memory effect) [5]

จากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์การจจจรูป (Shape memory effect) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เมื่อให้แรงหรือเปลี่ยนรูปร่างโลหะไปแล้วโลหะสามารถกลับคืนรูปร่างตัวเองได้เมื่อให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมปรากฏการณ์การจจจรูปสามารถแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิได้เป็น 2 แบบ คือ การจจจรูปแบบทิศทางเดียว (One-way shape memory effect) กล่าวคือ ถ้านำสปริงจจจรูปที่เดิมหดสั้นมาดึงให้ยืดออกที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นทำให้สปริงนี้ร้อนขึ้นสปริงจะหดกลับรูปเดิมอย่างไรก็ตามถ้าทำให้สปริงเย็นลงอีกครั้งสปริงจะหดตัวอยู่อย่างนั้นปรากฏการณ์การจจจรูปอีกแบบหนึ่ง เรียกว่า การจจจรูปแบบสองทิศทาง (Two-way shape memory effect) ถ้านำสปริงจจจรูปแบบสองทิศทางที่เดิมหดสั้นที่อุณหภูมิต่ำมาทำให้ร้อนขึ้นสปริงจะยืดออกเองโดยอัตโนมัติและถ้าทำให้สปริงเย็นลงอีกครั้งสปริงจะหดตัวกลับเองโดยอัตโนมัติเช่นกัน เห็นว่าโลหะจจจรูปแบบ 2 ทิศทางสามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับไปกลับมา 2 แบบได้โดยใช้การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเท่านั้นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งคือสามารถทำให้โลหะจจจรูปแบบทิศทางเดียวให้กลายเป็นแบบสองทิศทางได้โดยใช้กระบวนการเชิงกล-ความร้อน (Thermo-mechanical treatment) การฝึกสอนโลหะจจจรูปแบบทิศทางเดียวให้มีความจำเพิ่มขึ้นโดยกระบวนการฝึกสอนโลหะจจจรูปแบบสองทิศทาง (TWSM training) เป็นการใช้กระบวนการทางกล-ความร้อนการฝึกสอน คือการจำกัดจำนวนของมาร์เทนไซต์ที่สามารถเกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกทำซ้ำที่อุณหภูมิร้อน-เย็นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะจำรูป (ก) One way shape memory effect และ (ข) Two way shape memory effect [5]

2.1.3.2 เซรามิกที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramics) [6]

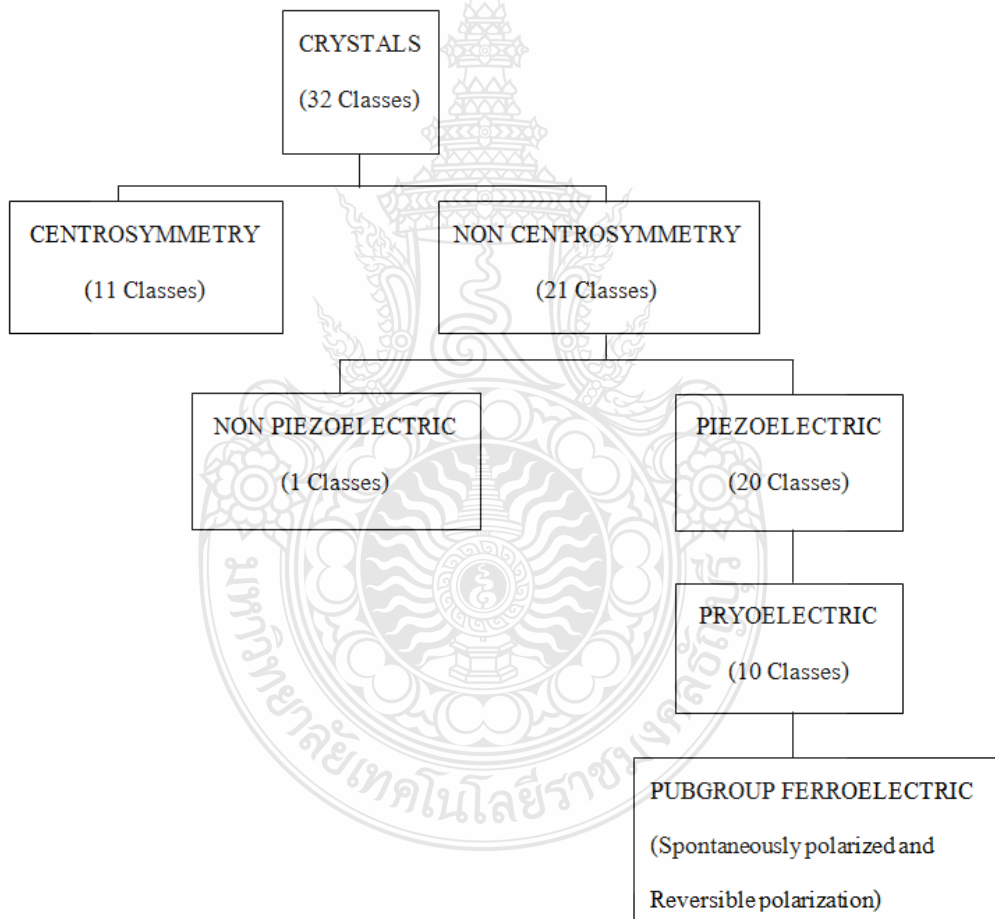
ในปี ค.ศ. 1880 ปราภฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ได้ถูกค้นพบโดย Pierre Curies [7] ได้ศึกษาผลของความดันต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกควอตซ์ (Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) และอัญมณี (Tourmaline) ว่าสามารถให้กำเนิดไฟฟ้าได้เมื่อมีแรงกดกระทำต่อผลึก เขาให้ชื่อกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า ปรากฏการณ์ เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) และต่อมาในปี ค.ศ.1881 Gabriel Lippmann [8] ได้ศึกษาค้นพบปรากฏการณ์ย้อนกลับได้ ถ้าให้ไฟฟ้าเข้าไปในผลึก ผลึกก็จะสั่นได้ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้รับแรงเค้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการประจุไฟฟ้า (Electric charge) หรือ การจัดเรียงตัวทางแสงขึ้น (Polarization) เรียกว่า “ผลทางตรง” (Direct effect) เมื่อนำวงจรต่อเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงอัดจะมีกระแสไหลเข้าวงจรและหากเปลี่ยนเป็นแรงดึงจะเกิดกระแสไหลในทิศทางข้าม การประยุกต์จากผลทางตรงเช่น ไมโครโฟน และสัญญาณโซนาร์ เป็นต้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าจะเกิดแรงเครียดอัดภายในผลึก (Compression strain) ทำให้วัสดุเกิดการบิดรูปไปจากเดิม และหากกลับทิศทางของสนามจะเกิดแรงเครียดดึง (Tensile strain) ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ผลทางอ้อม (Indirect effect, Converse effect) งานประยุกต์ผลทางอ้อมเช่น เต้าจุดแก๊ส, อุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic transducers) แอคทูเอเตอร์ (Actuators) เป็นต้น

1) ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

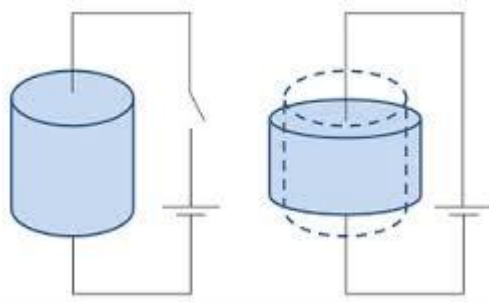
มีการแบ่งระบบ โครงสร้างผลึกเป็น 7 ระบบ โดยโครงสร้างผลึกสามารถแบ่งเป็น 32 กลุ่ม ผลึกทั้ง 32 กลุ่มสามารถแบ่งหมวดได้ดังรูปที่ 2.9

2) ปฏิกิริยาการเพียโซอิเล็กทริก

เนื่องจากความไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของผลึกเซลล์ (Non-Centrosymmetry) เมื่อมีแรงกดจะทำให้ ไดโพล เกิดขึ้น และเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้น ในทำนองกลับกันเมื่อมีแรงดึงจะทำให้ ไดโพลเกิดขึ้น และเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 2.10 ในทำนองเดียวกันเมื่อเราป้อนแรงดันบนเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ตัวเซรามิกจะขยายและหดตัว ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ดังรูปที่ 2.10

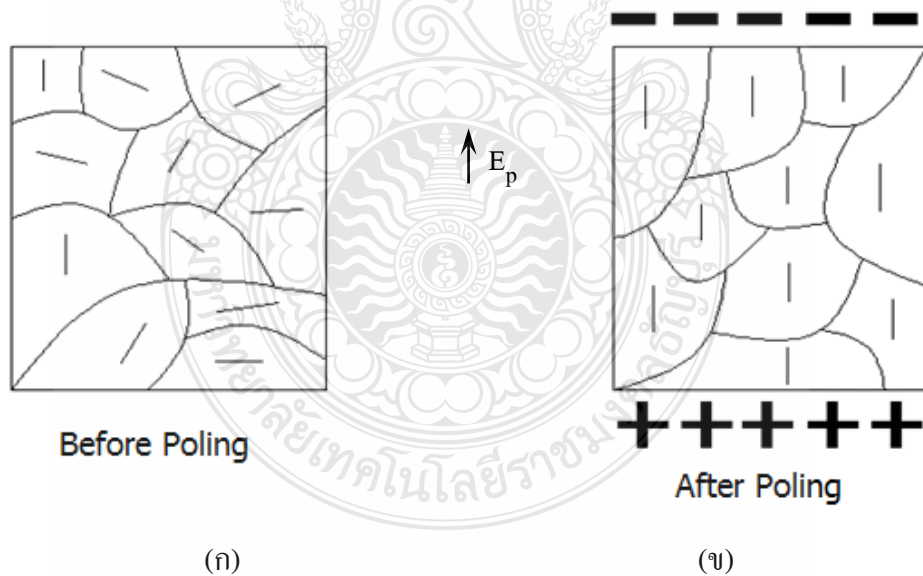


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของการแบ่งโครงสร้างของผลึก [6]



รูปที่ 2.10 แสดงปรากฏการณ์ Piezoelectricity [6]

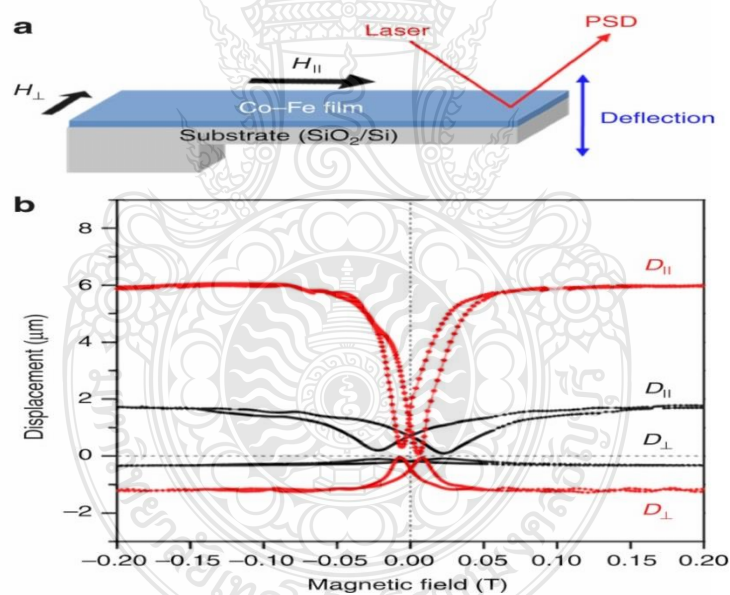
เพียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีการจัดเรียงตัวทางแสง (Polarization) ตามธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจาก Ferroelectric สารเพียโซอิเล็กทริกนั้นหลังจากการตัดให้เป็นชิ้นใหม่ๆ ขั้วสองขั้ว (Dipoles) ที่มีอยู่ในส่วน (Grains) ต่างๆ นั้นไม่ได้เรียงไปในแนวทางเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการ Poling เพื่อให้ Dipoles ต่างๆ เรียงไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งหากปราศจากกระบวนการ Poling แล้ว สารเพียโซจะไม่แสดงสมบัติพิเศษใดๆ เลย การ Poling จะกระทำที่อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c)



รูปที่ 2.11 การ Poling of Piezoelectric Ceramics [6]

2.1.3.3 วัสดุแมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive material) [7]

วัสดุแมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive material) คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้คล้ายกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก แต่แตกต่างกันตรงที่วัสดุแมกนีโตสตริกทิฟสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ภายใต้สนามแม่เหล็ก จะเป็นของแข็งที่สามารถเปลี่ยนรูปได้มากเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้ วัสดุแมกนีโตสตริกทิฟที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น TERFENOL-D และ Galfenol (Fe-Gallium) เป็นต้น ทั้งนี้ วัสดุแมกนีโตสตริกทิฟในประเทศสหรัฐฯ ที่ได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนา เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่นระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยการสั่นสะเทือน (Optimal vibration-based energy harvesting system) และฟิล์มบาง (Thin film) จากรูปภาพที่ 2.12 แสดงถึงเทคนิคการสร้าง Thin film magnetostriction โดยใช้ Substrate คือ SiO_2/Si และมีฟิล์มบาง Co-Fe อยู่ด้านบน ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Displacement และ Magnetic field



รูปที่ 2.12 เทคนิคการสร้าง Thin film magnetostriction [8]

2.1.4 การนำไฟฟ้าของวัสดุ

กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางหลายๆ ชนิด เรียกตัวกลางที่มีสมบัติยอมให้ไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านได้ว่าตัวนำไฟฟ้าขณะที่มีกระแสไฟฟ้าในตัวนำ แสดงว่ามีการนำไฟฟ้า ตัวพาประจุในวัสดุ ได้แก่ อิเล็กตรอน เช่น ในวัสดุจำพวกโลหะ โพซิทีฟโฮล (Positive holes) เช่น ในวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor materials) [9]

2.1.4.1 การแบ่งประเภทการนำไฟฟ้าของวัสดุ

วัสดุนำไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของตัวพาประจุได้แก่ สารตัวนำไฟฟ้า (Conductor) โลหะทุกชนิดเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) โดยอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่โดยเสรีไม่เป็นระเบียบ ไม่มีทิศทางแน่นอนเรียกดังแสดงในรูป 2.13 ประจุลบเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแบบสุ่ม การเคลื่อนที่แบบนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระทุกตัวจึงเป็นศูนย์ แต่เมื่อทำให้ปลายทั้งสองของแท่งโลหะมีความต่างศักย์ไฟฟ้า เช่น ต่อไว้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในแท่งโลหะ แรงจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ โดยมีความเร็วเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ เรียกว่าความเร็วลอยเลื่อน (Drift velocity) จึงมีกระแสไฟฟ้าในแท่งโลหะ [9]



รูปที่ 2.13 ประจุลบเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแบบสุ่มทำให้ไม่มีกระแสสุทธิ [17]



ก. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก

ข. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ

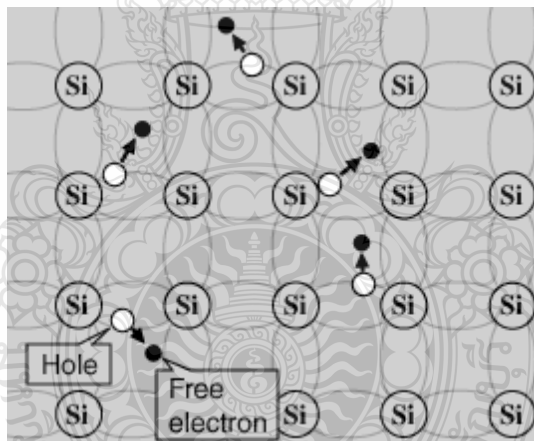
รูปที่ 2.14 แสดงกระแสของประจุไฟฟ้าเมื่อมีสนามไฟฟ้า ก. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก
ข. อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ [9]

2.1.4.2 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า คือสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำกับฉนวนวัสดุส่วนมากในกลุ่มนี้เป็นแข็งประเภทที่อะตอมของธาตุยึดเกาะด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) และประเภทพันธะไอออนิก (Ionic bond) ตามปกติวัสดุพวกนี้ไม่นำไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ไม่สามารถไหลได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอ แต่ถ้าเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอน เช่น การให้ความร้อน ฉายแสง หรือการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า อิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ได้และทำให้วัสดุนั้นกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า [10]

2.1.4.3 ชนิดของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า

สารกึ่งตัวนำเนื้อแท้ (Intrinsic semiconductor) ในสถานะที่เย็นสารกึ่งตัวนำเนื้อแท้จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเลย หรือพันธะระหว่างอะตอมไม่แตกต่างกันแต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พันธะแตก มีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระเกิดขึ้นเป็นคู่ๆ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีคู่อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ไปในเนื้อสารได้ เมื่อคู่อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่รวมกันขึ้น สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันดี คือ ซิลิกอน และเจอร์มาเนียม เรียกสารเหล่านี้ว่า สารเตตระเวเลนซ์ [10]

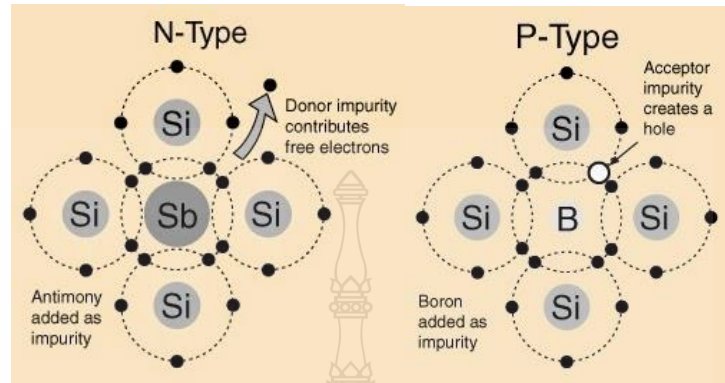


รูปที่ 2.15 อิเล็กตรอนและหลุมใน โครงสร้างของซิลิกอน [10]

สารกึ่งตัวนำกระแสไฟฟ้าดัดแปลง (Extrinsic semiconductor) สารกึ่งตัวนำซิลิกอนหรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์เมื่อถูกใส่สารอื่นเจือปนลงไปจะทำให้เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำดัดแปลง หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิก มี 2 แบบคือ แบบเอ็น (N Type) กับแบบพี (P Type)

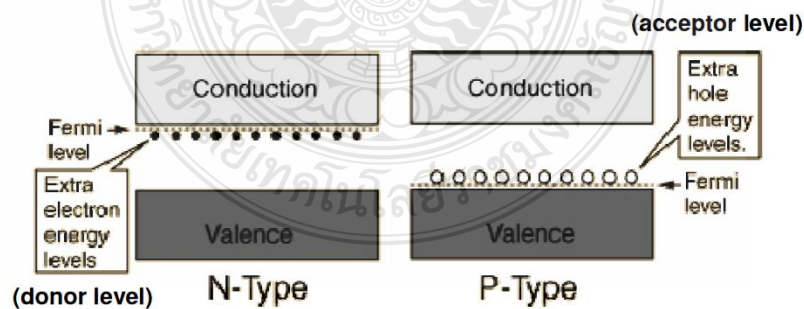
สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N Type) คือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว หรือสารเพนเตเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอน 4 ตัว ของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น 1 ตัว เคลื่อนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำ

ดัดแปลงนี้ การที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ สารที่นำมาเจือปน โดยมากเป็นธาตุในหมู่ 5A เช่น อาเซนิก (As) ฟอสฟอรัส(P)และแอนติโมนี(Sb)



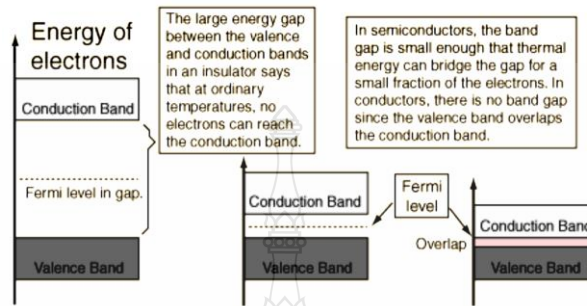
รูปที่ 2.16 สารกึ่งตัวนำประเภท N สารกึ่งตัวนำประเภท P [10]

สารกึ่งตัวนำแบบพี (P Type) คือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก (Valence electron) 3 ตัว หรือสารไตรเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอนเพียง 3 ตัวของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำทำให้ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว สำหรับสร้างพันธะกับสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นโฮล (Hole) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ การที่มีโฮลอิสระทำให้มีการเรียกสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ว่า แบบพี (P Type) สารที่นำมาเจือปนประเภทนี้เป็นธาตุในหมู่ 3A ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) แกลเลียม (Ga) และ โบรอน (B)



รูปที่ 2.17 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบextrinsic [10]

สารที่เป็นฉนวน (Insulator) วัสดุจำพวกฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material) ไม่ว่าจะให้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน หรือแสง แก้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็ยังไม่สามารถเข้ามาอยู่ในแถบตัวนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 แสดงแถบพลังงานของ (ก) วัสดุฉนวนไฟฟ้า (ข) วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า และ (ค) วัสดุตัวนำไฟฟ้า [10]

2.1.4.4 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity)

ตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) กระแสไฟฟ้า (I) จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V) ที่ใส่เข้าไป แต่จะเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับความต้านทาน (R) ของตัวนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.1)

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความยาวของตัวนำไฟฟ้า (l) และเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า (A) ดังสมการที่ (2.2)

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.2)$$

โดยที่ ρ คือ สภาพการต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับวัสดุแต่ละชนิดที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) จะเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้างี้

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

หน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้าในหน่วย SI จะเรียกว่า Siemens (S) เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆเป็นดังตารางที่ 2.1

กฎของโอห์ม สามารถเขียนได้ในรูปของความหนาแน่นกระแส (Current density, J หน่วย A/m^2) ดังนี้

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma E \quad (2.4)$$

โดยที่ E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) มีหน่วย คือ V/m ซึ่งมี J และ E เป็นปริมาณเวกเตอร์ ที่ไม่ขึ้นกับรูปร่างลักษณะของตัวนำไฟฟ้า [10]

ตารางที่ 2.1 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง [10]

ชนิดของวัสดุ	สาร	สภาพการนำไฟฟ้า (S)
สารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า	เงิน	6.3×10^7
	ทองแดง	5.8×10^7
	ทอง	4.2×10^7
	อลูมิเนียม	3.4×10^7
	แกรไฟต์	1×10^5
สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า	เจอร์เมเนียม	2.2
	ซิลิคอน	4.3×10^{-4}
สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้า	พอลิเอทิลีน	1×10^{-14}
	พอลิสไตรีน	1×10^{-14}
	เพชร	1×10^{-14}

ที่อุณหภูมิห้อง นิวเคลียสที่มีประจุบวกนั้นจะเกิดการสั่น ในขณะที่อิเล็กตรอนของตัวนำไฟฟ้านั้นสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปซึ่ง

อาจพุ่งชนนิวเคลียสได้ทำให้มีความเร็วลดลง ดังนั้นความเร็วโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่า ความเร็วลอยเลื่อนนั้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ดังนี้

$$v_d = \mu E \quad (2.5)$$

เมื่อ μ คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็น $\text{m}^2/(\text{Vs})$

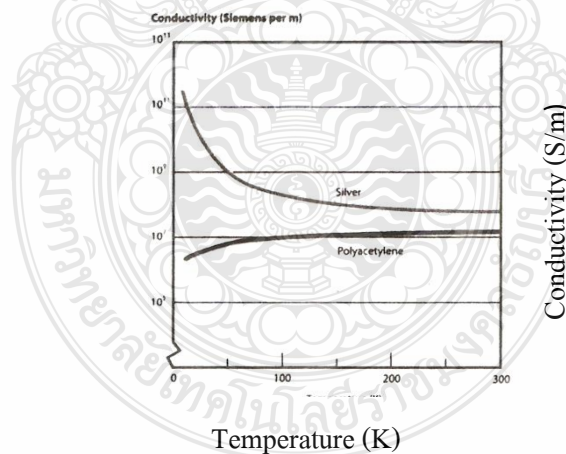
อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งหน่วยปริมาตร ค่าประจุของอิเล็กตรอน ($e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$) และความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (v_d) ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแส (J) จึงมีค่าดังนี้

$$J = nev_d \quad (2.6)$$

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนอิเล็กตรอน ดังนั้น

$$\sigma = \frac{nev_d}{E} = ne\mu \quad (2.7)$$

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ นั่น จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการนำไฟฟ้าของวัสดุ



รูปที่ 2.19 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและโลหะที่อุณหภูมิต่าง [16]

ในกรณีของตัวนำไฟฟ้านั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การชนกันของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสมียมากขึ้น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดลง สภาพการนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าจึงลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้สามารถข้ามชั้นของ Energy band gap (E_g) ได้ต้องอาศัยพลังงานความร้อน โดยที่จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนี้

$$n \propto e^{-E_g / kT} \quad (2.8)$$

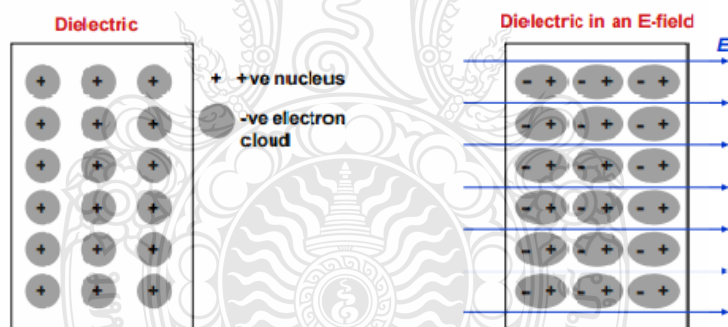
นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำจึงเป็นปฏิกิริยากับอุณหภูมิดังนี้

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g / kT} \quad (2.9)$$

2.1.5 Polarization [11]

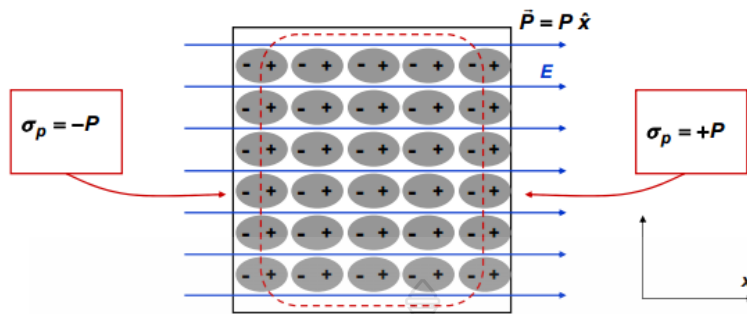
2.1.5.1 ทฤษฎี Polarization

ทฤษฎี Polarization คือการเคลื่อนที่มีระนาบการสั่นของอนุภาคหรือมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงระนาบเดียว โพลาริเซชัน เป็นสมบัติคลื่นตามวัสดุจำนวนมากไม่ได้มีอิเล็กตรอนอิสระ ที่สามารถย้ายไปรอบ ๆ แต่มีอิเล็กตรอนผูกไว้กับอะตอมที่แสดงด้านล่าง รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 Dielectrics in Electric Fields - Polarization [11]

โดย วัสดุโพลาริเซชันและ ค่าความหนาแน่นพื้นผิวสิ่งที่อยู่ในกล่องมีค่าเฉลี่ยที่เป็นกลาง (หมายเลขเดียวกันของค่าบวกและลบ) ในทางด้านซ้ายมีพื้นผิวเชิงลบสุทธิค่าความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นเป็นผลมาจากวัสดุโพลาริเซชัน ด้านขวาของวัสดุมีพื้นผิวที่เป็นบวกสุทธิค่าความหนาแน่น วัสดุที่เป็นเป็นผลมาจากวัสดุโพลาริเซชันดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 Material Polarization and Surface Charge Densities [11]

2.1.6 ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (Capacitance)

ค่าความจุของตัวเก็บประจุ หมายถึง ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด(Farad) ตัวเก็บประจุที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้ 1 ฟารัดหมายถึงเมื่อป้อนแรงเคลื่อนจำนวน 1 โวลต์ จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ในเวลา 1 นาที ให้กับแผ่นเพลททั้งสอง สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ 1 คูอมบ์ จากความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าและแรงดัน[19] ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังที่ 2.11

$$C=Q/V \tag{2.11}$$

โดยที่ C = ค่าการเก็บประจุหน่วยเป็นฟารัด (F)

Q = ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น (C)

V = แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

2.1.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ) เป็นสมบัติทาง ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (Polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ วัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material) มีความเป็นขั้ว (Polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนกัน

ระหว่างแผ่นเพลท ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละตัวจะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กตริกต่างกันถึงแม้จะมีขนาดเท่ากัน ค่าความจุและอัตราทนแรงดันอาจแตกต่างกันออกไป สูญญากาศเป็น ไดอิเล็กตริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น การจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากเกินไปอาจทำให้ไดอิเล็กตริกสูญเสียสภาพจากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้ [12] ดังในตาราง ที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
สูญญากาศ	1
อากาศ	1.0006
เซรามิก	30-7500
ไมก้า	5.5
ไมลา	3
น้ำมัน	4

2.1.8 ทฤษฎี มอดูลัสพลศาสตร์ (Dynamic modulus)

มอดูลัสแบบไดนามิก คือ อัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดภายใต้เงื่อนไขที่การสั่นสะเทือน (คำนวณจากข้อมูลที่ได้รับจากทั้งการทดสอบการสั่นสะเทือนหรือบังคับในแรงเฉือน, การบีบอัดหรือการยืดตัว) เป็นสมบัติของวัสดุหนึ่ง [13]

การสะสมและการสูญเสียโมดูลัสในความหนืดจะวัดพลังงานที่เก็บไว้ในส่วนที่ยืดหยุ่นและพลังงานความร้อนกระจายไปในส่วนหนืด ความต้านทานแรงดึงของการสะสมและการสูญเสียโมดูลัสที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 2.12-2.13

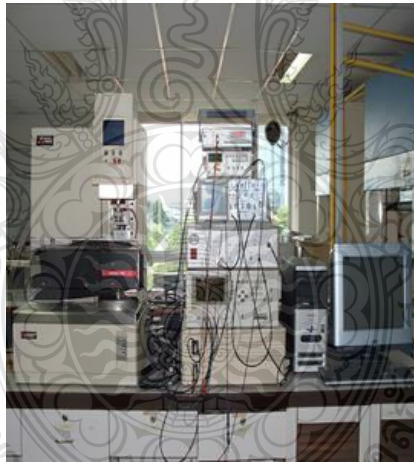
$$\text{Storage: } E' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta \quad (2.12)$$

$$\text{Loss: } E'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta \quad (2.13)$$

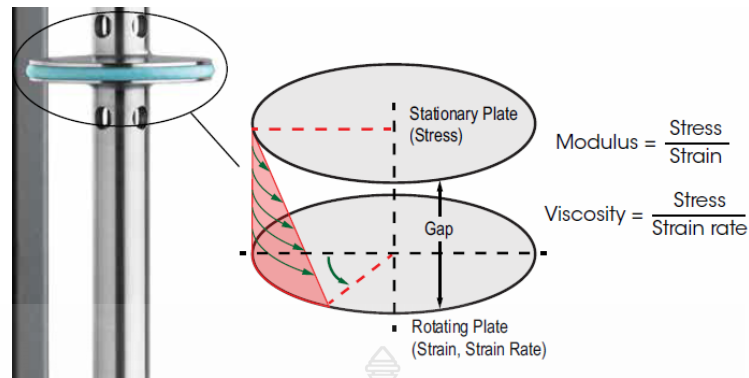
2.1.9 Parallel Plat Rheometer [14]

รีโอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำที่มีเนื้อหาที่น่าสนใจในการตั้งค่ารูปทรงเรขาคณิตควบคุมสภาพแวดล้อมรอบๆและนำไปใช้ขนาดช่วงกว้างของความเครียดความเค้นและอัตราความเครียดที่แรงบิดที่วัดจากแปลงสัญญาณไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการและ มีการติดตั้งงานแรงบิดทรงกลมสำหรับการบิดของตัววัสดุ ที่ตั้งรูปที่ 2.22

การตอบสนองต่อความเครียดวัสดุและความเค้นจะแตกต่างกันไปจากชนิดไปยังยึดหยุ่นในการรวมกันของพฤติกรรมความหนืดและยึดหยุ่นที่เรียกว่า Viscoelasticity สมบัติหยุ่นหนืดคือ พฤติกรรมการตอบสนองต่อความเค้นที่กระทำของวัสดุ เช่น พลาสติก ยาง เป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงสมบัติของแข็งที่ยึดหยุ่น (Elastic) และของเหลวหนืด (Viscous) โดยที่สมบัติทางด้าน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ความเค้น (Stress) และอัตราความเครียด (Strain rate) พฤติกรรมเหล่านี้จะวัดในสมบัติของวัสดุ เช่น โมดูลัสความหนืดและยึดหยุ่นดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 Parallel Plat Rheometer (Rheometric scientific Inc,ARES)



รูปที่ 2.23 การตอบสนองต่อความเครียดวัสดุและความเค้น

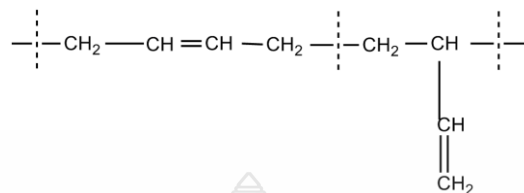
2.1.10 ยางสังเคราะห์

ยางสังเคราะห์ได้มีการผลิตมานานแล้ว ตั้งแต่ ค.ศ. 1940 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้มีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นในอดีต เนื่องจากการขาดแคลนยางธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์และปัญหาในการขนส่งจากแหล่งผลิตในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาการผลิตยางสังเคราะห์เพื่อให้ได้ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการในการใช้งานที่สภาวะต่าง ๆ เช่น ที่สภาวะทนต่อน้ำมัน ทนความร้อน ทนความเย็น เป็นต้น การใช้งานยางสังเคราะห์จะแบ่งตามการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทคือ ยางสำหรับงานทั่วไป (Commodity rubbers) เช่น IR (Isoprene rubber) BR (Butadiene rubber) ยางสำหรับงานสภาวะพิเศษ (Specialty rubbers) เช่น การใช้งานในสภาวะอากาศร้อนจัด หนาวจัด หรือ สภาวะที่มีการสัมผัสกับน้ำมัน ได้แก่ Silicone, Acrylate rubber เป็นต้น การผลิตยางสังเคราะห์เป็นจะผลิตโดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งการพอลิเมอไรเซชันคือ ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์ จากมอนอเมอร์ โดยพอลิเมอร์ ในที่นี้คือ ยางสังเคราะห์ที่ต้องการผลิต ในส่วนของมอนอเมอร์ คือสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยานั้นเอง [15]

2.1.17 ชนิดของยางสังเคราะห์

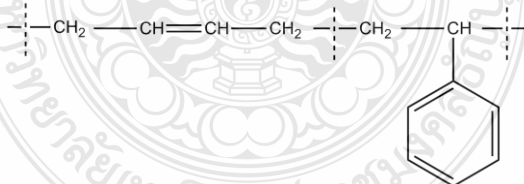
ยางบิวตาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวได้ทั้งแบบ cis-1,4 แบบ tran-1,4 และแบบ vinyl-1,2 โดยยางชนิดนี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 250,000-300,000 จะมีสมบัติ ความยืดหยุ่นสูงมาก ทำให้มีการกระด้างกระดอนสูงที่สุดในบรรดายางทั้งหมด สมบัติเด่นด้านความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อการขีดถู ความสามารถในการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ ความร้อนสะสมในยางต่ำ และเป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ยางบิวตาไดอีนส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรม

ยางล้อ เพราะเป็นยางที่มีความต้านทานต่อการขีดถูสูง และมักถูกนำไปทำใส่ในลูกกอล์ฟและลูกฟุตบอลเนื่องจากมีสมบัติด้านการกระเดื่องตัวที่ดีจะมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ยางบิวตาไดอีน (Butadiene Rubber, BR)

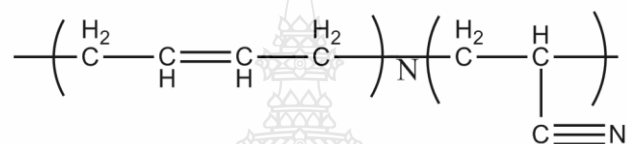
ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) เกิดจากการโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสุมด้วยเทคนิคแบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization) หรือเทคนิคแบบสารละลาย (Solution polymerization) ระหว่างมอนอเมอร์สองชนิด คือ สไตรีนและบิวตาไดอีน ยางเอสบีอาร์มีค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิห้องประมาณ 0.93 และถือว่าเป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในวงการอุตสาหกรรมยาง อีกทั้งสามารถแปรรูปได้ง่าย จึงทำประหยัดทั้งต้นทุนวัตถุดิบ และแรงงานการผลิต ทนต่อกรด ค้างเงิองจาง แอลกอฮอล์ น้ำ ไกลคอล เกลือ และน้ำมันซิลิโคนได้เป็นอย่างดี แต่ไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและไฮโดรคาร์บอน เป็นยางสังเคราะห์ที่ทนทานต่อการเสียดสีได้ดี ดังนั้นจึงใช้ในการทำพื้นรองเท้า สายพานและยางรถยนต์ เป็นต้น จะมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)

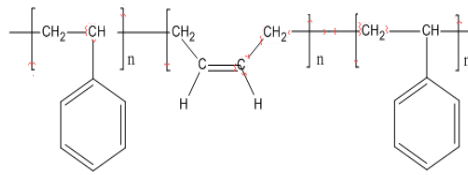
ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR) เป็นโคพอลิเมอร์ของ อะไครโลไนไตรล์ และบิวตาไดอีน ยางชนิดนี้มีความเป็นขี้สูง ยางชนิดนี้จึงมีคุณสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ต่างๆ ได้ดี เนื่องจากยางชนิดนี้ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็น บิวตาไดอีน ซึ่งจะให้ความยืดหยุ่น และส่วนที่เรียกว่าอะไครโรไนไตรล์ซึ่งเป็น

ส่วนที่จะทำให้คุณสมบัติของยาง NBR เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ หากยังเพิ่มปริมาณ อะโครโรไนโรล จะทำให้มีความทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น การกระเด็งกระดอนต่ำลง Compression Set น้อยลง อัตราการซึมผ่านก๊าซลดลง สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำลดลง ความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงขึ้น ความต้านทานการขูดสูงชัน ความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ความหนาแน่นสูงขึ้น ยางไนไตรล์เป็นยางที่ไม่ตกผลึกเมื่อถูกยืด ดังนั้นจึงมีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำจำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย ส่วนในเรื่องความยืดหยุ่นจะมีค่าใกล้เคียงกับยาง SBR ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสน้ำมัน ทนต่อความร้อน และต้านทานต่อการขูด เช่น ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล เป็นต้น จะมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.26



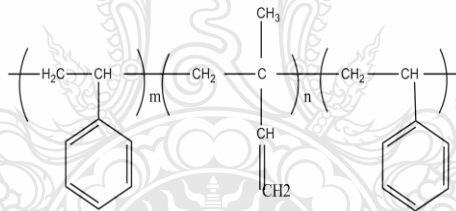
รูปที่ 2.26 ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR)

ยางสไตรีน-บิวทไดอีน-สไตรีน (Styrene- Butadiene- Styrene, SBS) สไตรีน นิโกล็อกโคโพลิเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีราคาถูกกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กลุ่มอื่น มีสมบัติทนทานต่อการเสียดสี และความล้า สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี วัสดุกลุ่มนี้ถูกประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น เอสบีเอสใช้เป็นส่วประกอบรองเท้า เป็นยางแข็งที่ใช้สำหรับการทำพื้นของรองเท้ายางคอกยางและอื่น ๆ ที่มีความทนทานเป็นสิ่งสำคัญ มันเป็นส่วนหนึ่งของพอลิเมอร์ที่เรียกว่าพอลิเมอร์บล็อก ห่วงโซ่แกนหลักของมันถูกสร้างขึ้นจากสามส่วน ส่วนแรกก็คือโซ่ยาวของสไตรีน, ตรงกลางเป็นโซ่ยาวของ polybutadiene และส่วนสุดท้ายคือส่วนยาวของ สไตรีน ยาง SBS จะมีสมบัติเหมือน กลุ่มสไตรีนที่มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อกลุ่มสไตรีนเป็นหนึ่งในหนึ่งโมเลกุล SBS ร่วมหนึ่งก้อและห่วงโซ่สไตรีนอื่น ๆ ของทาง SBS โมเลกุลเดียวกันร่วมกันอีกกลุ่มที่แตกต่างกันกลายเป็นที่เชื่อมโยงกันด้วยโซ่ polybutadiene ยาง นี้จะช่วยให้อายุขัย ความสามารถในการที่จะรักษารูปร่างของมันหลังจากที่ถูกยืด จะมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ยางสไตรีน-บิวทไดเอน-สไตรีน (Styrene- Butadiene- Styrene, SBS)

ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene, SIS) ยางเทอร์โมพลาสติกจากสไตรีน เป็นยางเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยบล็อกโคโพลิเมอร์อย่างน้อย 3 บล็อกของสไตรีนกับไดอีน โดยที่มีบล็อกแรกกับบล็อกสุดท้าย (ส่วนแข็ง) เป็นโพลีสไตรีนและมีบล็อกตรงกลาง (ส่วนอ่อน) เป็นโพลีไดอีนหรือโพลีไดอีนไฮโดรจีเนต ยางเทอร์โมพลาสติกชนิดนี้มีการนำไปใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกที่สุด เหมาะสำหรับทำชิ้นส่วนยานยนต์ สายไฟและสายเคเบิล รองเท้า และอุปกรณ์การแพทย์ จะมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene, SIS)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ และผลการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ ที่สามารถนำไปประยุกต์ในการทำวิจัย ยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

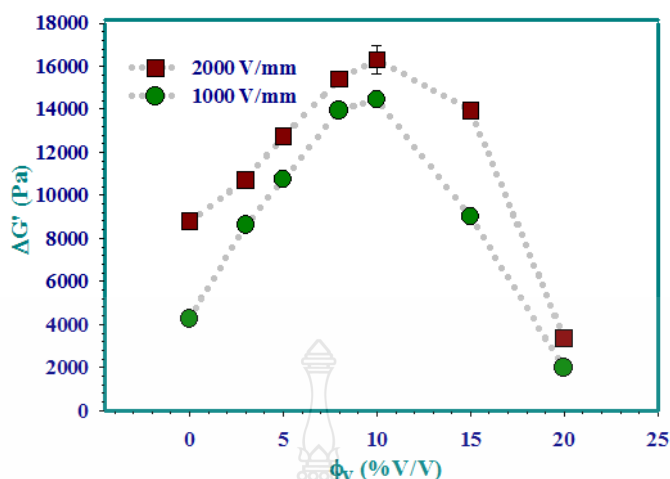
ในปี 2001 ครูซ และคณะ (Krause *et al.*, 2001) ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิอะนิลีนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการเป็นแอคทูเอเตอร์โดยวัดค่าโมดูลัสแบบกดเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกแล้วค่าโมดูลัสของระบบพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ดังนั้นครูซและคณะจึงสรุปว่าระบบพอลิเมอร์ผสมนี้มีความสามารถที่จะประยุกต์ใช้เป็นแอคทูเอเตอร์ได้[16]

พีเฮอร์และคณะ (Feher *et al.*, 2001) ได้ทำการเตรียมวัสดุใหม่สำหรับเป็นแอคทิวเอเตอร์โดยทำการผสมวัสดุผสมระหว่าง TiO_2 กับพอลิไคเมทิลไซลอคเซนที่มีอัตราการเชื่อมโยงแบบอ่อน โดยเมื่อมีการกระตุ้นวัสดุผสมนี้โดยไฟฟ้าแรงสูง วัสดุผสมนี้สามารถบดองได้เมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า 1 – 10 กิโลโวลต์ [17]

ปีค.ศ. 2006 เต็มพงษ์และคณะ (Puvanattvattana *et al.*, 2006) เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไทโอพีนและพอลิไอโซพรีนเพื่อศึกษาผลของปริมาณของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของพอลิไทโอพีนเพิ่มขึ้น โมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจาก พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิไทโอพีนมีหน้าที่เป็นสารเติมแต่งในเนื้อพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก [18]

ปี 2007 สปอนแตคและคณะ (Spontak *et al.*, 2007) ทำการศึกษาอิเล็กทรอนิกส์พอลิเมอร์ตอบสนองโดยประจุไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้เป็นสนามไฟฟ้าด้วยเหตุนี้ความแตกต่างของ EAPs อีออนมักจะต้องใช้ตัวทำละลายปานกลางเกิดการเคลื่อนที่แบบอิเล็กทรอนิกส์ และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเพื่อเกิดการกระตุ้นที่สัมพันธ์กับ EAPs อิเล็กทรอนิกส์ การกระตุ้นจะให้เกิดความเครียดที่สูงกว่ามีความทนทานและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น [19]

ปี 2009 สุนนมาลย์และคณะ (Niamlang *et al.*, 2009) ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสม พอลิพาราฟินิลีนไวไนลีนและพอลิไคเมทิลไซลอคเซน และศึกษาผลของปริมาณของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าปริมาณพอลิพาราฟินิลีนไวไนลีน 10% โดยปริมาตรนั้นเป็นปริมาณสูงสุดที่จะทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้แสดงการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสได้มากที่สุดเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก แสดงคังรูปที่ 2.29 [20]



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงค่าสโตเรจมอดุลัสเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกของ พอลิเมอร์ผสมพอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีนและพอลิไดเมทิลไซลอคเซน [20]

ในปี 2011 อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์และคณะ (Sirivat *et al.*, 2011) ได้ศึกษาผลกระทบของความเข้มของสนามอิเล็กทริกคองทีแฉะไฟฟ้ากับมุมเบี่ยงเบนและแรง Dielectrophoresis ของยางอะคริลีสไตรีนและพอลิเมอร์พบว่าแรง Dielectrophoresis ยางทั้ง 6 ชนิดได้รับการพิจารณาในการติดตั้งคานแนวตั้งโดยการวัดระยะเบี่ยงเบนภายใต้จุดแข็งของสนามไฟฟ้าต่างๆ แรงจะถูกคำนวณจากทฤษฎีการเบี่ยงเบนไม่เป็นเส้นตรงของคาน ขณะที่สนามไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในยางทั้ง 5 ด้วยข้อยกเว้นของ SAR ที่ให้ความสนใจไปทางด้านขั้วบวกของขั้วไฟฟ้า สำหรับยางเหล่านี้ช่วงเวลาที่ขั้วภายในถูกสร้างขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าที่นำไปสู่แรงดึงดูดระหว่างยางและขั้วบวก SAR มีสิ่งเจือปนโลหะ (Cu และ Zn) พิจารณาจาก EDX ซึ่งจะมีแรงผลักระหว่าง Cu^{2+} และ Zn^{2+} ไอออนและอิเล็กโทรด Aniodic นำไปสู่การต่อขั้วไฟฟ้าที่เป็นกลางแรง Dielectrophoresis ในยางทั้ง 6 ชนิดโดยทั่วไปเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความเข้มแรงของสนามไฟฟ้าและเพิ่ม Monotonically ที่มีค่าคองทีอิเล็กทริก AR71 ($\epsilon' = 6.33$) มีจุดเชื่อมต่อผลผลิตต่ำสุดไฟฟ้า (75 V / มม.) แต่มันก็สร้างแรงสูงสุด ในทางตรงกันข้าม, SIS ($\epsilon' = 2.74$) มีจุดเชื่อมต่อผลผลิตสูงสุดไฟฟ้า (400 V / มม.) และทำให้เกิดแรงต่ำที่สุด [21]

ในปี 2011 ยงชอกโซและชาวคณะ (Yongsok Seo *et al.*, 2011) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของอนุภาคนาโนคอมโพสิตถูกสังเกตเห็นโดย SEM และ TEM ภาพที่แสดงให้เห็นการกระจายตัวที่ดีกว่าของอนุภาคนาโนซิลิกาในเมทริกซ์ PANI มวลร้อยละของนาโนซิลิกาในนาโนคอมโพสิตได้รับการยืนยันว่าจะประมาณ 14% โดยข้อมูล TGA ที่ทำการการศึกษา การไหลจะสนับสนุนที่ FluidER PANI / นาโนซิลิกาขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพดีกว่าแสดงให้ความเครียดมีอัตราสูงกว่า Pure PANI

นอกจากนี้การวิเคราะห์ห่ออิเล็กทรอนิกส์ เปิดเผยว่านาโนคอมโพสิตขึ้นอยู่ Fluid ER และมีPolarizabilityหรือความสามารถในการเกิดขั้ว ที่สูงขึ้นและตอบสนองได้เร็วขึ้น [22]

ในปี 2014 ราฮิม มัคลู และชาวคณะ (Rahim Mutluet *et al.*, 2011) ได้ทดลองPolymer Electroactive (EAP)ตัวกระตุ้นหรือที่เรียกว่ากล้ามเนื้อเทียมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นเช่นการใช้พลังงานต่ำน้ำหนักเบาต่ำ การปฏิบัติตามและความเข้ากันได้ทางชีวภาพ วิธีการที่ได้รับการเสนอรูปแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมการโค้งงอในแบบคงที่ด้วยความสนใจมากในการจ่ายให้กับพฤติกรรมแบบไดนามิก ดังนั้นเราจึงแนะนำวิธีการเพิ่มรูปแบบพฤติกรรมการโค้งงอแบบไม่เป็นเส้นตรงโดยมีการปฏิบัติ (Manipulators) หุ่นยนต์เป็นอัจฉริยะและอ่อนนุ่ม วิธีการประกอบด้วยรูปแบบจลนศาสตร์ผกผันและแบบไดนามิกวิธีการที่นำเสนออย่างถูกต้องประมาณการการเบี่ยงเบนรูปร่างตัวกระตุ้น EAP ของทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ตาม โซลูชันจลนศาสตร์ผกผันบูรณาการกับรูปแบบไดนามิก กลไฟฟ้าผลการทดลองและตัวเลขนั้นจะแสดงประสิทธิภาพของรูปแบบนุ่มหุ่นยนต์หุ่นยนต์ในการประมาณตัดพฤติกรรมอย่างไม่เป็นเส้นตรงของพอลิเมอร์ Electroactive พอลิพีโรล (PPY-EAP) กระตุ้นวิธีการเสนอสามารถจะขยายไปยังการโค้งงอของตัวกระตุ้นชนิดๆและ Manipulators สมาร์ทที่ใช้งาน [23]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

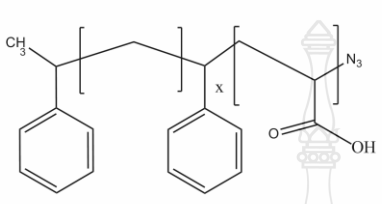
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

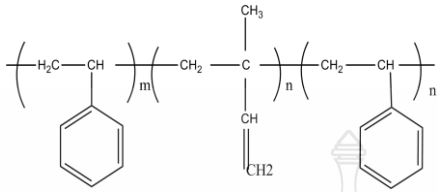
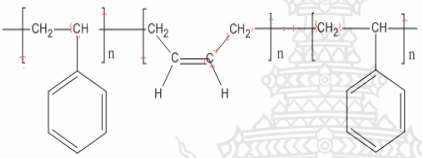
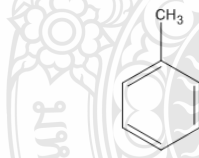
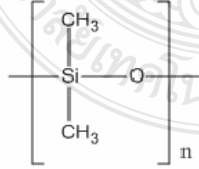
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลา (สิงหาคม 57-มิถุนายน 58)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล	←→												
2. วางแผนการดำเนินงาน	←→												
3. จัดเตรียมวัสดุคืบและเครื่องมือ			←→										
4. สอบหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์			←→										
5. เตรียมขึ้นรูปยางสังเคราะห์						←→							
6. ทำการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้า								←→					
7. วิเคราะห์และรวบรวมผลการทดลอง									←→				
8. สรุปผลการทดลอง										←→			
9. เผยแพร่และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์											←→		

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบ	สูตรโครงสร้าง	เกรด	บริษัท	หน้าที่
1.ยางสไตรีนอะคริลิก (Styrene Acrylic Rubber, SAR)		UCAR DA27	DowChemical Co., Ltd	ยาง สังเคราะห์
2.ยางอะคริลิก (Acrylic Rubber, AR)	$\left(-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \right)_x \left(-\text{CH}_2 - \underset{\text{C}=\text{O}}{\underset{\text{CCH}_3}{\text{CH}}} - \right)_y \left(-\underset{\text{O}=\text{C}}{\underset{\text{OH}}{\text{CH}}} - \text{CH} - \right)_z$	AR7018	NipponZeon polymixAdvance Co., Ltd	ยาง สังเคราะห์
3.ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber, SBR)	$\left[-\text{CH}_2 - \text{CH}=\text{CH} - \text{CH}_2 - \right]_x \left[-\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} - \right]_y$	SBR 1502	บริษัท เค.เอส.มา ชูกิจ จำกัด	ยาง สังเคราะห์
4.ยางบิวตาไดอีน (Butadiene Rubber, BR)	$\left[-\text{CH}_2 - \text{CH}=\text{CH} - \text{CH}_2 - \right]_x \left[-\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}=\text{CH}_2}{\text{CH}} - \right]_y$	BR 1208	บริษัท เค.เอส.มา ชูกิจ จำกัด	ยาง สังเคราะห์
5.ยางไนไตร (Nitrile rubber, NBR)	$\left(-\text{C}_2\text{H}_4 - \text{CH}=\text{CH} - \text{C}_2\text{H}_4 - \right)_x \left(-\text{C}_2\text{H}_4 - \underset{\text{C}\equiv\text{N}}{\text{CH}} - \right)_y$	CR E33	บริษัท เค.เอส.มา ชูกิจ จำกัด	ยาง สังเคราะห์

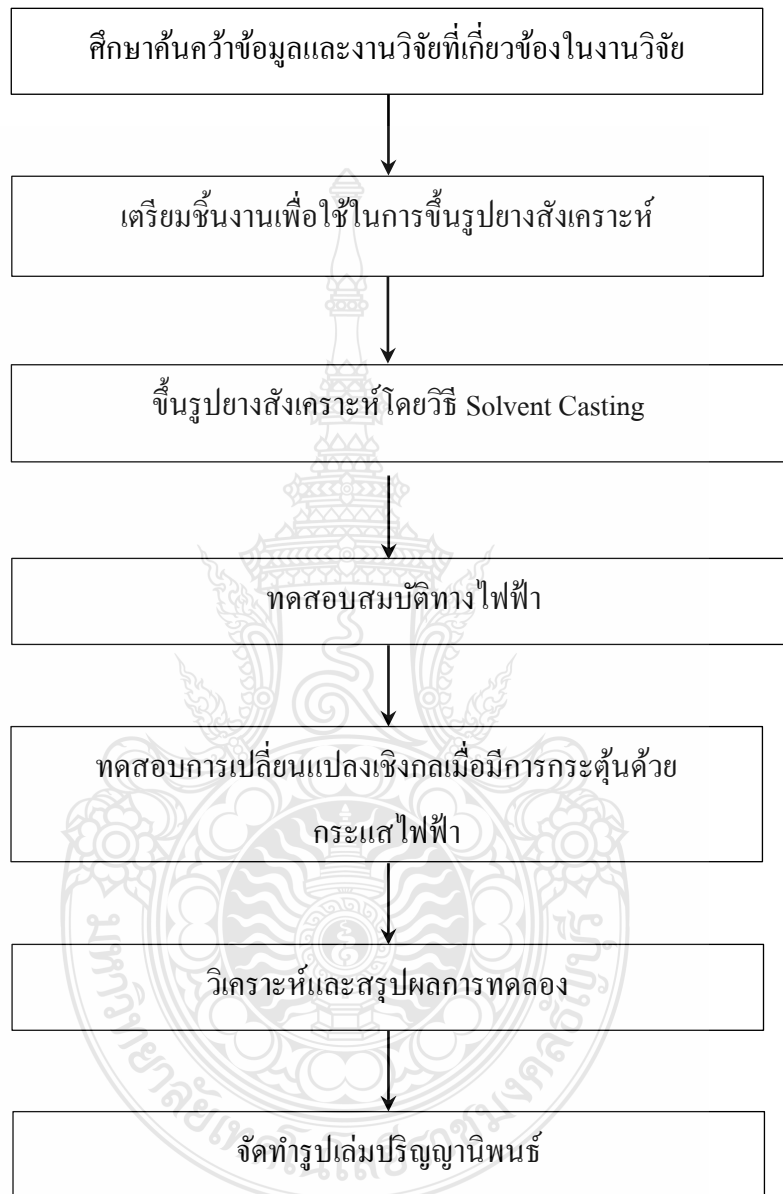
วัตถุดิบ	สูตรโครงสร้าง	เกรด	บริษัท	หน้าที่
6.ยางสไต รีน-ไอโซพ รีน-สไตรีน (Styrene- Isoprene- Styrene,SIS)		D1112P	Sigma aldrich	ยาง สังเคราะห์
7.ยางสไต รีน-บิวทสไต รีน-สไตรีน (Styrene- Butadiene- Systyrene, SBS)		432490 ALDR ICH	Sigma aldrich	ยาง สังเคราะห์
8.โทลูอีน (Toluene)		UN 1294	VWR International S.A.R	ตัวทำ ละลาย
9.Silicone oil		50 Cst	Sigma aldrich	ความหนืด

3.2.1 อุปกรณ์

- 3.2.1.1 เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.2.1.2 ชุดเครื่องมือแก้วต่างๆ เช่น บีกเกอร์ กระจกตวง แท่งคน เป็นต้น
- 3.2.1.3 เครื่องมือทดสอบการนำไฟฟ้า
- 3.2.1.4 จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- 3.2.1.5 เครื่อง Parallel Plate Rheometer (Rheometric scientific Inc,ARES)
- 3.2.1.6 เครื่อง LCR Meter รุ่น LCR-8101G ยี่ห้อ Instek
- 3.2.1.7 เครื่อง EDX (Energy Dispersive X-raySpectrometerp ยี่ห้อ Oxford Instruments)



3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย



3.4 การทดลองการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ ยางสไตรีนอะคริลิก และ ยางอะคริลิก

ยาง Styrene acrylic rubber และ Acrylic ขึ้นรูปโดยนำยางสังเคราะห์เหล่านี้เทลงในโมลด์ ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิห้อง และความดันปกติ

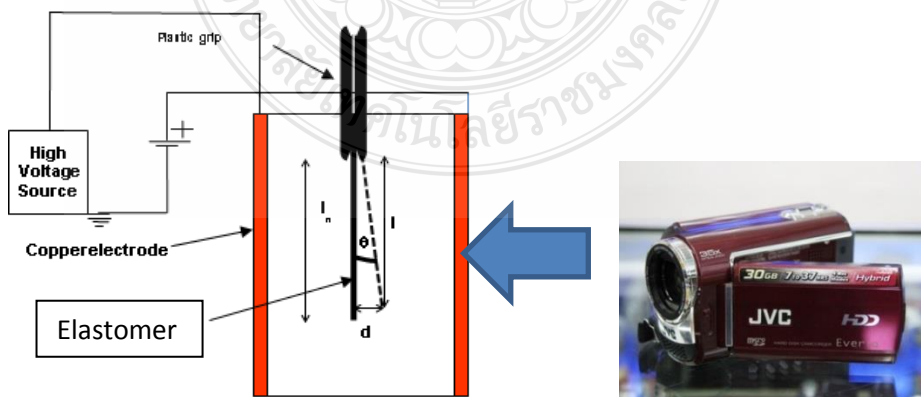
3.5 การทดลองการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน ยางบิวตะไดอิน ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ยางไนไตร ยางสไตรีน-บิวทสไดอิน-สไตรีน

นำยางทั้ง 5 ชนิด คือ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน ยางบิวตะไดอิน ยางสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ยางไนไตร ยางสไตรีน-บิวทสไดอิน-สไตรีน มาตัดชิ้นเล็กๆ มาละลายในตัวทำละลาย ทูลอีน 10 cm³ ในจานเพาะเชื้อ ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 วัน จะได้ยางที่มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

3.6 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์

3.6.1 การวัดค่าการบิดงอภายใต้การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าภายนอก

นำยางสังเคราะห์ มาตัดที่ขนาด กว้างxยาวxสูง 5x60x3 มิลลิเมตร แล้วนำไปหนีบที่ตัวจับAluminium แล้วหย่อนไปใน silicone oil ความหนืด ให้อยู่ระหว่างแผ่นแดงทั้งสอง ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแผ่นทองแดงถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply) และทำการถ่ายวิดีโอด้วยกล้อง Digital Camera รุ่น JVC และวัดขนาดมุมด้วยโปรแกรม Perfect screen ruler



รูปที่ 3.1 การวัดการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลทางไฟฟ้า

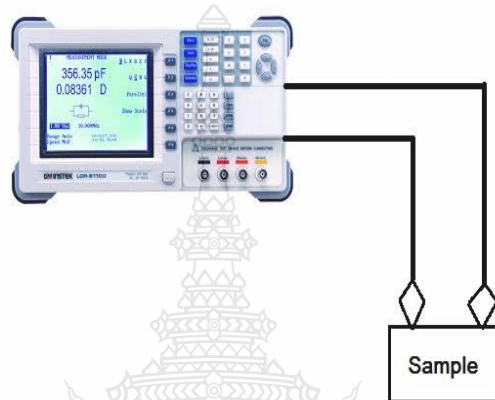
ทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงกลเมื่อมีการกระตุ้นจากไฟฟ้าการวัดสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอกอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 27 °C โดยเครื่อง (ParallelPlateRheometer Rheometric scientificInc,ARES) ชิ้นงานถูกเตรียมมีขนาดความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรมอดูลัสสะสม (Storage modulus) และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ถูกวัดที่ความถี่ 0.1-100 rad/s แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่อง Parallel Plate Rheometer

3.8 การวัดค่าความสามารถในการเก็บประจุ

การทดสอบค่าความสามารถในการเก็บประจุ (Capacitance) จะทำการวัดชิ้นงานขนาด กว้าง x ยาว x หนา คือ 5 x 60 x 3 มิลลิเมตรที่ อุณหภูมิห้อง ที่ ย่านความถี่ 10Hz - 2MHz โดยเครื่อง LCR Meter (LCR-8101G) ดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งในการหาค่าการเก็บประจุนั้น จะหาสามารถนำไปหาค่า คงที่ไดอิเล็กทริก ได้ เพราะ ความสามารถในการเก็บประจุแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังสมการที่ 2.14



รูปที่ 3.3 การวัดค่าการความสามารถในการเก็บประจุ

$$\epsilon' = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (2.14)$$

- โดยที่ C = ค่าเก็บประจุ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์/โวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)
D = ความหนาของแผ่นตัวนำ
 ϵ_0 = ค่าสภาพซึมซาบได้ในสุญญากาศ คือ $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$
A = พื้นที่ของแผ่นตัวนำ

3.9 การคำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟเรซิส (Dielectrophoresis, F_D)

ไดอิเล็กโตรโฟเรซิสเป็นการเคลื่อนที่ในแนวขนาน (Translational motion) ของอนุภาคที่เป็นกลาง (Neutral matter) ในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform electric field) โดยมีสาเหตุจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน (Polarization) ของอนุภาคนั้นๆ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงไดอิเล็กโตรโฟเรซิสซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.15

$$F_D = mg \sin \theta + F_d \quad (2.15)$$

$$F_d = \frac{d(3EI)}{l^3} \quad (2.16)$$

- เมื่อ
- V คือ ระยะทางของการบิดงอสุดท้าย
 - E คือ ค่าข้มอดูลัส มีค่าเท่ากับ $2G(1+\nu)$
 - G คือ ค่ามอดูลัสเฉือน ($\omega = 1 \text{ rad/s}$)
 - I คือ ค่าโมเมนต์ของอินเนอร์เซีย ซึ่งมีค่า $= \frac{1}{12} + t^3 w$
 - t คือ ค่าความหนาของยางสังเคราะห์ (mm)
 - w คือ ค่าความกว้างของยางสังเคราะห์ (cm)
 - l คือ ค่าความยาวยางสังเคราะห์ (cm)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้ทำการเตรียมชิ้นงานยางสังเคราะห์ สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า โดยได้ศึกษาอิทธิพลปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองเชิงไฟฟ้าทางกลของยางสังเคราะห์ต่างๆที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างแตกต่างกัน และคำนวณค่าแรงทางไฟฟ้า (Dielectrophoresis force, F_d)ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกของยางสังเคราะห์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน ได้ผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้

เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน ชิ้นงานยางสังเคราะห์ขนาด 5 x 60 x 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้

ตัวอย่าง	ลักษณะกายภาพ	รูป
SAR	มีลักษณะสีขาวขุ่นนุ่มเหนียว ไม่ติดมือ	
AR	มีลักษณะสีขาวใสนุ่มไม่เหนียว	
SBR	มีลักษณะสีเหลืองขุ่น แข็ง เหนียว	
BR	มีลักษณะสีขาวใสนุ่ม	
NBR	มีลักษณะสีเหลืองขุ่นนุ่ม	

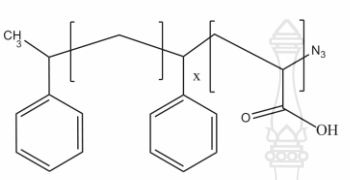
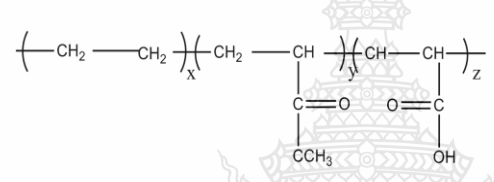
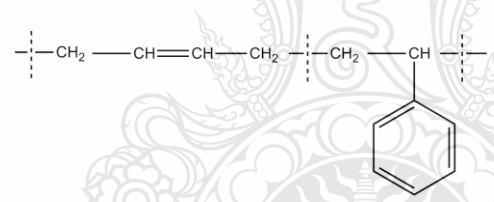
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้(ต่อ)

ตัวอย่าง	ลักษณะกายภาพ	รูป
SBS	มีลักษณะขาวใสแข็ง เหนียว ไม่ติดมือ	
SIS14%	มีลักษณะขาวขุ่นนึ่ม	
SIS17%	มีลักษณะขาวขุ่นนึ่ม	
SIS22%	มีลักษณะขาวขุ่นนึ่ม	

4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์

เนื่องจากสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์นั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติการนำไฟฟ้า (Conductivity) การต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ความสามารถในการเก็บประจุ (Capacitance) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกส์ (Dielectric constance) ดังนั้นเพื่อทำการศึกษาสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ยางสังเคราะห์ทั้ง 7 ชนิดอันได้แก่ SAR BR SBR AR SBS NBR และ SIS จึงถูกนำมาขึ้นรูปที่ 5 x 60 x 3 มิลลิเมตร และนำมาวัดค่าการนำไฟฟ้า การต้านทานไฟฟ้าและค่าความสามารถในการเก็บประจุด้วยเครื่อง LCR meter (LCR-8101G) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และแสดงผลสมบัติทางไฟฟ้าในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ต่างๆ

ตัวอย่างยางสังเคราะห์	สูตรโครงสร้าง	C(PF)	R(Ω)	ε'
SAR		513	148,000	6.75×10^{-6}
AR		474	138,000	6.24×10^{-6}
SBR		327	220,000	4.54×10^{-6}

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ต่างๆ(ต่อ)

ตัวอย่างยางสังเคราะห์	สูตรโครงสร้าง	C(PF)	R(Ω)	ε'
BR		287	213,000	4.69x10 ⁻⁶
NBR		285	288,000	3.47x10 ⁻⁶
SBS		327	379,000	1.56x10 ⁻⁶
SIS 14%		289	342,000	2.32x10 ⁻⁶
SIS 17%		332	495,000	2.81x10 ⁻⁶
SIS 22%		415	518,000	3.92x10 ⁻⁶

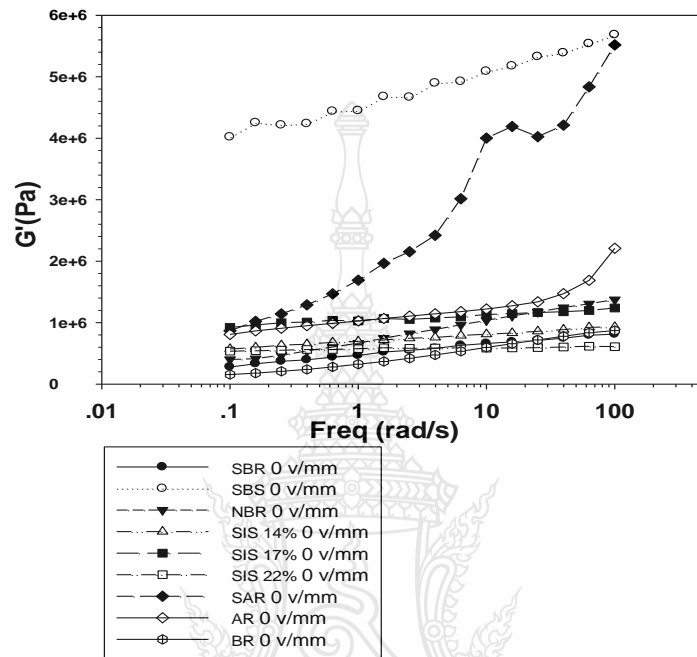
จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของยางสังเคราะห์นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อสายโซ่โมเลกุลของยางสังเคราะห์มีหมุมมีขั้วมากขึ้น เมื่อดูจากสูตรโครงสร้างของยางสังเคราะห์แต่ละตัวซึ่งยาง SIS เปอร์เซ็น ของ สไตรีน เพิ่มขึ้น ค่าการเก็บประจุเพิ่มและ ค่าความต้านเพิ่มขึ้นตาม เปอร์เซ็นของสไตรีน แต่ละยางชนิด SAR มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด และ ค่าการนำน้อยที่สุดคือ SBS โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. J. WALTMA และคณะ [24] ที่ศึกษาเกี่ยวกับ ผลของ โครงสร้างของ

พอลิเมอร์ต่อพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ซึ่งจะพบว่า โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์จะมีผลต่อปฏิกิริยาทางไฟฟ้าซึ่งทำให้เราค้นพบว่าสิ่งที่ทำให้ค่าต่างๆเปลี่ยนนั้น เกิดจาก สูตรโครงสร้างของยางแต่ละชนิด ซึ่งจะมีสูตร โครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน.และเพื่อคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของยางสังเคราะห์ ค่าความสามารถในการเก็บประจุ (Capacitance, C) จากตารางที่ 4.2 ถูกลำมาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant, ϵ') ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ϵ') ของยาง SAR, AR, SBR, BR, NBR, SBS, SIS 14%, SIS 17% และ SIS 22% คือ 515,475,328,288,286,328,290,416 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของยางจะขึ้นอยู่กับ ความจุของตัวเก็บประจุ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ที่ลดลงเนื่องจากการลดลงของข้อสัมผัส โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Kunanuruksapong, และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความแรงของสนามไดอิเล็กทริกคงที่และ แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิสของยางอะคริลิสรีไทรอินและพอลิเมอร์ซึ่งจะพบว่า ในตัวของยางสังเคราะห์นั้นจะมีไอออนที่ต่างกันจึงทำให้มีผลต่อการเพิ่มขึ้น หรือลดลง ของค่าความจุของตัวเก็บประจุ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

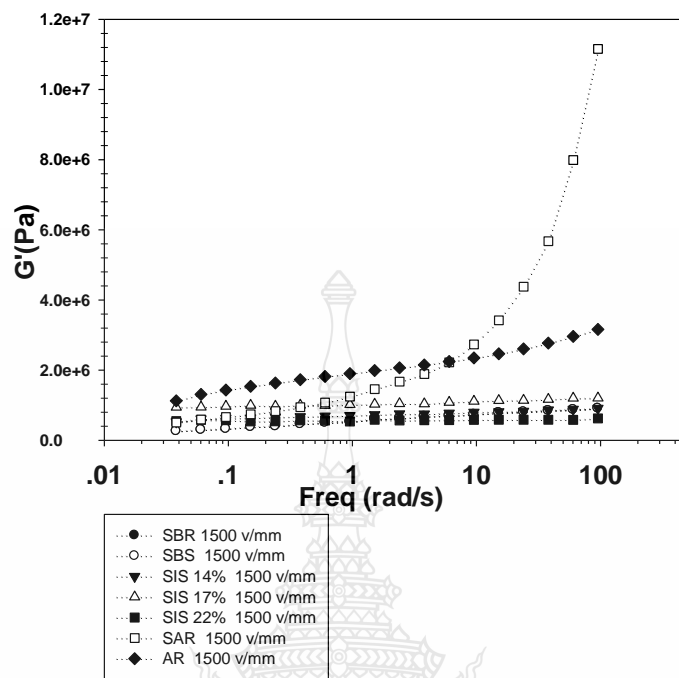
4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางสังเคราะห์ในระบบที่มีและไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า

เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของยางสังเคราะห์ยางธรรมชาติยางธรรมชาติที่ถูกตัดให้เป็นชิ้นงานขนาดความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรภายใต้สนามไฟฟ้า 0-1500 V/mm ได้ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ด้วยเครื่อง Parallel Plate Rheometer Rheometric scientific Inc, ARES) ในระบบที่มีและไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก เพื่ออธิบายพฤติกรรมของส่วนอีลาสติก และส่วนวิสคอสตามลำดับ ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์ในระบบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก พบว่าทุกระบบการเชื่อมโยงค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ค่อยๆสูงขึ้นเมื่อความถี่ของการบิดสูงขึ้น และค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) สูงกว่า มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกนั้นค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ยังคงแสดงพฤติกรรมคล้ายกับระบบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วนั้นค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) นั้นจะสูงขึ้นโดยแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.2 เนื่องจากมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าแล้วระบบเกิดพอลาไรซ์ของสายโซ่ทำให้เกิดพันธะทางกายภาพเกิดขึ้น จึงต้องใช้แรง

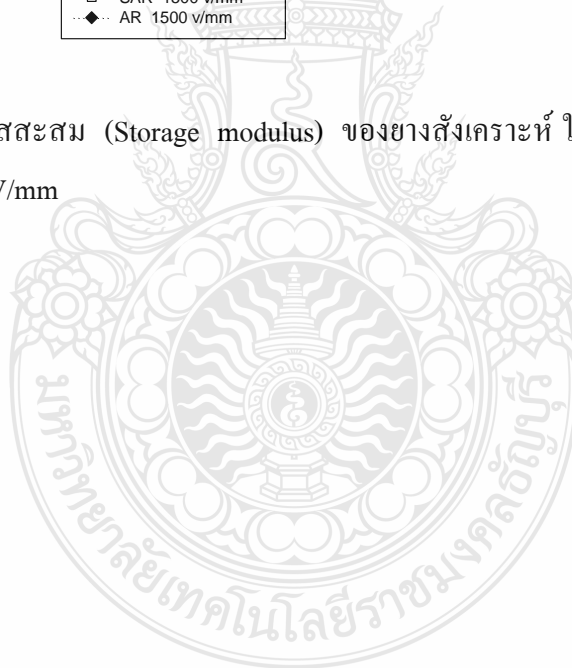
มากขึ้นในการบิดโครงสร้าง ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น ทำให้ ต้องใช้แรงบิดมากขึ้นทำให้ค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

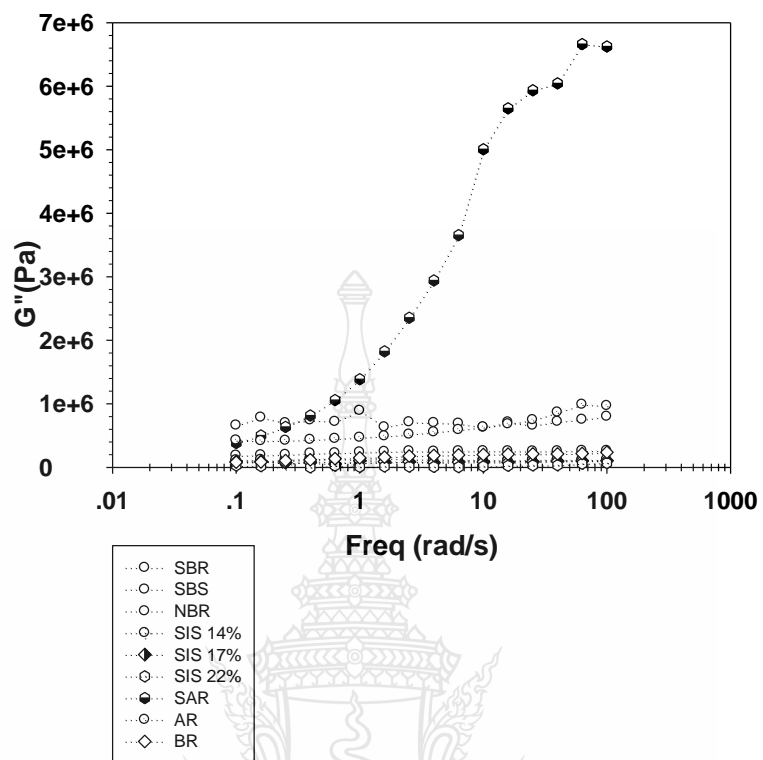


รูปที่ 4.1 ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ของยางธรรมชาติสังเคราะห์ ในระบบที่ไม่มีภาระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า



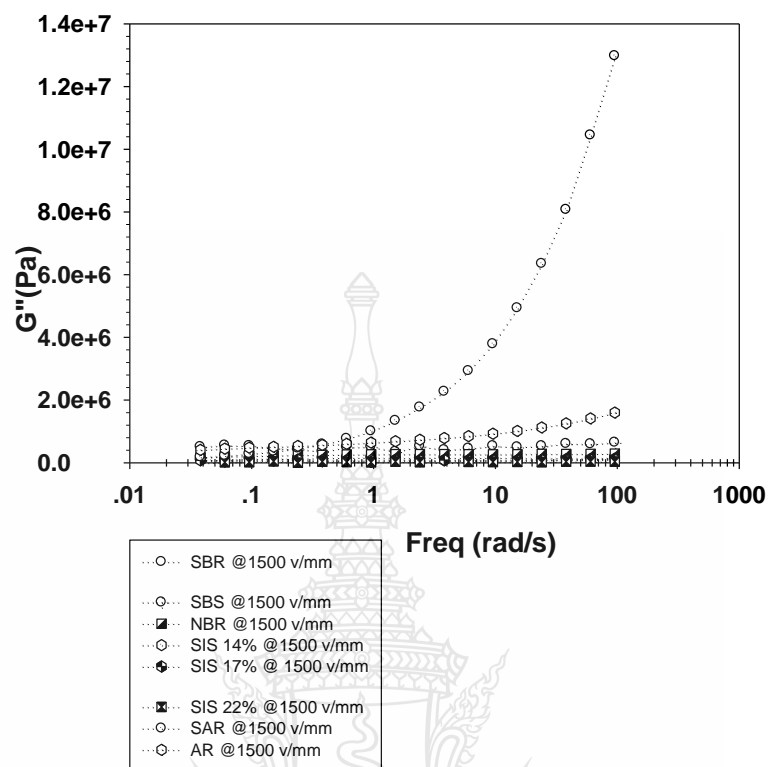
รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) ของยางสังเคราะห์ ในระบบที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 1,500 V/mm





รูปที่ 4.3 ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์ ในระบบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า

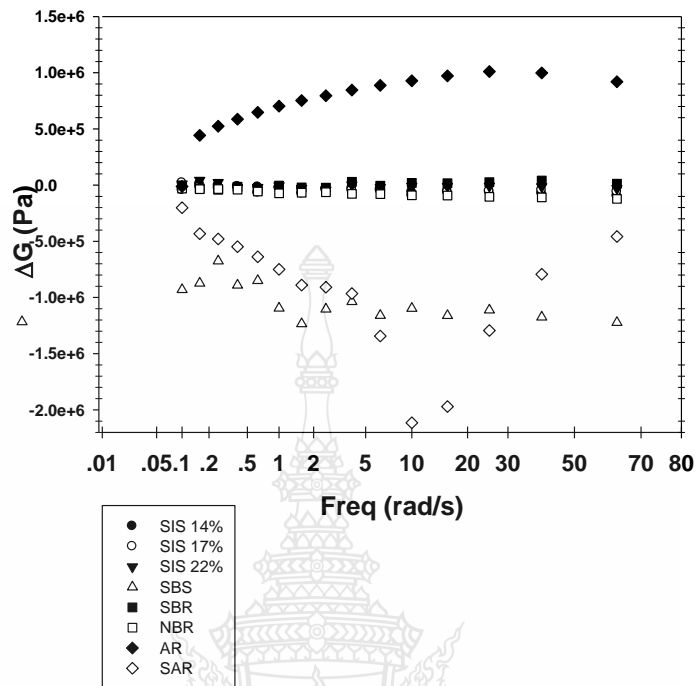




รูปที่ 4.4 ค่ามอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์ ในระบบที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 1500 V/mm

เพื่อหาการตอบสนองของการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก ค่ามอดูลัสจะสูงขึ้นเมื่อมีกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าระบบยาง ที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (0 V/mm) มีค่ามอดูลัสจะน้อยกว่า ระบบยางที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกความเข้ม 1500 V/mm แสดงดังรูป 4.2 เมื่อการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปในยาง โมเลกุลของยางเกิดการพอลาไรซ์เซชัน เกิดเป็นไดโพลโมเมนต์และ โมเลกุลยางเหล่านี้ก็จะพยายามดึงดูดกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดยางนี้

โดยค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) และมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางที่สังเคราะห์ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยเป็นการแสดงค่ามอดูลัสที่สามช่วงความถี่คือ 0.1, 1 และ 100 rad/s พบว่าที่ความถี่สูงขึ้นค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) นั้นสูงขึ้นด้วยเนื่องจากที่ความถี่สูงพฤติกรรมของยางไม่สามารถตอบสนองได้ทันตามความเร็วนั้น ทำให้ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) นั้นสูงกว่าที่ความถี่ต่ำ [25]



รูปที่ 4.5 ค่าผลต่างของมอดูลัสสะสม(Storage modulus) ของยางสังเคราะห์

เพื่อเปรียบเทียบผลต่อค่าสมบัติเชิงกล รูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าผลต่างของมอดูลัสสะสม (Storage modulus) เปรียบเทียบที่ความถี่ 0.1, 1 และ 100 rad/s โดยพบว่าค่าผลต่างของมอดูลัสสะสมของระบบยางที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก 1500 V/mm และระบบที่ไม่มี การกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก (Storage modulus response $\Delta G' = G'_{1500} - G'_0$) เมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก โดยการเพิ่มขึ้นของค่าผลต่างของมอดูลัสสะสม (Storage modulus) ต่อการเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่ามอดุลัสสะสมของยางสังเคราะห์ในช่วงความถี่ 0.1, 1 และ 100 rad/s และค่าการตอบสนองทางไฟฟ้า $\Delta G'$ (Pa)

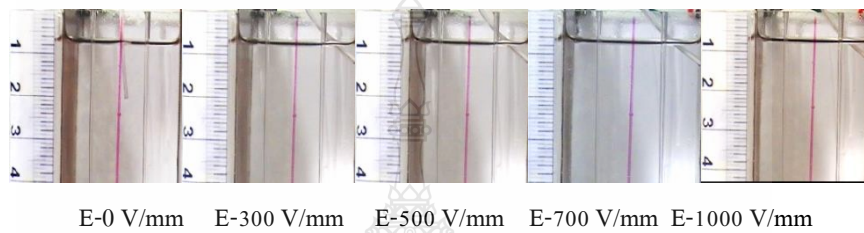
ตัวอย่าง	ความถี่ 0.1 rad/s			ความถี่ 1 rad/s			ความถี่ 100 rad/s		
	G'_{1500} (Pa)	G'_0 (Pa)	$\Delta G'$ (Pa)	G'_{1500} (Pa)	G'_0 (Pa)	$\Delta G'$ (Pa)	G'_{1500} (Pa)	G'_0 (Pa)	$\Delta G'$ (Pa)
SAR	507,690	868,680	360,990	1,246,000	169,130	1,076,870	1,115,500	5,518,200	5,636,800
AR	1,126,300	809,010	317,290	1,903,200	1,027,400	875,800	3,160,500	2,208,800	951,700
SBR	261,949	277,743	-15,793	526,171	466,362	59,809	908,812	814,147	94,665
NBR	432,020	400,470	31,550	737,837	664,273	73,563	1,494,005	1,374,892	119,113
SBS	3,089,435	4,020,107	-930,671	3,962,892	4,818,914	-856,022	4,883,450	5,923,310	-103,9860
SIS14%	527,429	571,134	-43,705	705,768	695,991	9,777	913,413	929,010	-15,596
SIS17%	941,863	922,500	19,363	101,8714	1,027,380	-8,665	1,203,588	1,239,379	-35,791
SIS22%	545,916	535,310	10,606	537,611	576,260	-3,648	623,850	609,488	14,361

เพื่อเปรียบเทียบผลของ $\Delta G'$ ดังตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าผลต่างของ $\Delta G'$ เปรียบเทียบในช่วงความถี่ 0.1, 1 และ 100 rad/s โดยพบว่าค่าผลต่างของ $\Delta G'$ เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความถี่ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าผลต่างของมอดูลัสสะสม (Storage modulus) ต่อการเพิ่มขึ้นของช่วงความถี่บางความถี่ $\Delta G'$ ติดลบ เนื่องจากค่าของ $\Delta G'$ ที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสม สูงกว่า เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าไดโพล โมเมนต์ของยางสังเคราะห์นั้นรบกวนกันเองทำให้ผลออกมา น้อยกว่าระบบที่มีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า และในตารางที่ 4.3 ตัว SBS มีค่า $\Delta G'$ ติดลบ ทุกช่วง ความถี่ ด้วยตัวยางมีลักษณะค่อนข้างแข็ง ทำให้เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกเป็นการเพิ่มพลังงานจากภายนอกทำให้เกิดการสั่นภายในโมเลกุล ทำให้ยางนั้นขึ้นซึ่งแรงนี้สามารถชนะแรงดึงดูดระหว่างไดโพล โมเมนต์ที่เกิดขึ้น ทำให้มอดูลัสสะสมเพิ่มเมื่อมีการกระตุ้นด้วย สนามไฟฟ้าจากภายนอกน้อยกว่าในระบบที่ไม่มีมีการกระตุ้นด้วยกระตุ้นจากสนามไฟฟ้า

4.4 การบิดงอของยางสังเคราะห์เมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก

เพื่อศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าของเสาการบิดงอ ภาชนะการบิดงอถูกวัดด้วยโปรแกรม Perfect Screen Ruler โดยชิ้นงานถูกเตรียมให้มีขนาด 5 x 60 x 3 มิลลิเมตร จุ่มลงในน้ำมันซิลิโคนที่บรรจุอยู่ในเซลล์อะคริลิกที่มีอิเล็กโทรดทองแดงประกบอยู่ทั้งสองข้างของเซลล์ ห่างกัน 4.2 เซนติเมตร จากนั้นไฟฟ้าแรงสูงถูกกระตุ้นโดยผ่านอิเล็กโทรดทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยศึกษาผลของสนามไฟฟ้าขนาด 0, 300, 500, 700, 1000 V/mm ต่อการบิดงอของยางสังเคราะห์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก พบว่าทุกชิ้นงานเกิดการบิดงอไปทางบวก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าน่าจะเกิดจากโมเลกุลส่วนที่มีขั้วเกิดการพอลาไรเซชัน เกิดขั้วทางไฟฟ้าขึ้นดังนั้นเสมือนขั้วลบจากยางสังเคราะห์จะบิดไปทางขั้วบวกของเซลล์ทดสอบ และเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าพบว่า การบิดงอของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานเกิดโพลาไรซ์มากขึ้นทำให้เกิดขั้วชัดเจนจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอมากขึ้นดังแสดงในรูป 4.5 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการคืนสภาพหลังกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก พบว่ายางสังเคราะห์บางชนิดชนิดกลับสู่สภาพเดิมเมื่อหยุดการกระตุ้น SAR, AR, SBR, NBR, SBS ไม่มีสภาพขั้วถาวร (Permanent dipole moment) เกิดขึ้น SIS14%, SIS17%, SIS22% เกิด Permanent dipole moment ขึ้น และแสดงเวลาในการคืนสภาพเดิม (Relaxation time, T_r) เพราะว่าเมื่อหยุดการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ยาง SIS14%, SIS17%, SIS22% กลับสู่สภาพเดิมก่อนกระตุ้นด้วย

สนามไฟฟ้าภายใน 3-10 วินาที แต่ยาง SAR, AR, SBR, NBR, SBS, BR ไม่สามารถกลับสู่ที่จุดเริ่มต้นได้ เนื่องจากน่าจะเกิดไดโพลโมเมนต์ถาวรเกิดขึ้นและ ยังมีแรงดึงดูดระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่อทองแดงในตารางที่ 4.4

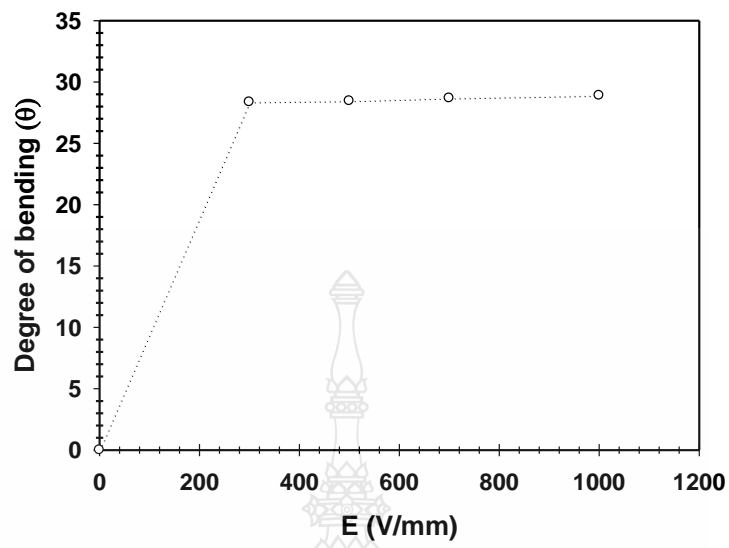


รูปที่ 4.6 แสดงการบิดงอของยางสังเคราะห์

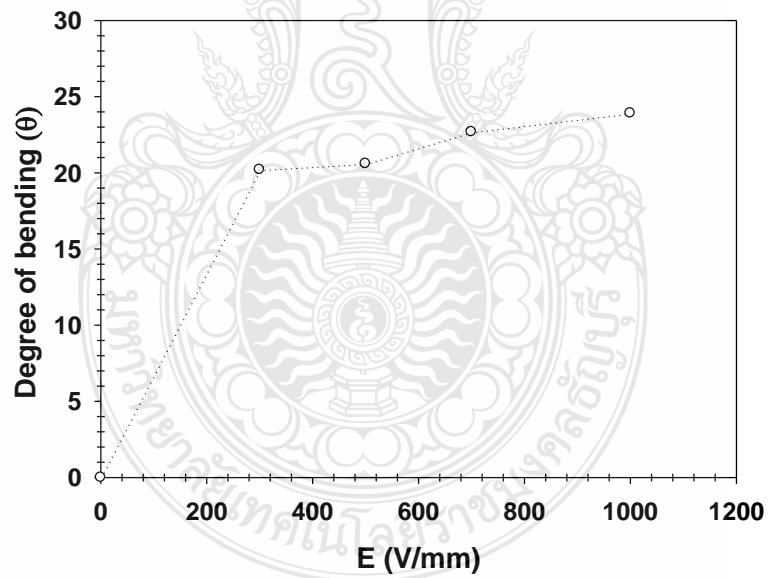
ตารางที่ 4.4 เวลาในการกลับสู่รูปเดิมจากการบิดงอที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก

Sample	T_r (s)			
	300 V/mm	500 V/mm	700 V/mm	1000 V/mm
SAR	-	-	-	-
AR	-	-	-	-
SBR	-	-	-	-
NBR	-	-	-	-
SBS	-	-	-	-
SIS14%	10	10	10	10
SIS17%	10	10	10	10
SIS22%	3	3	3	3

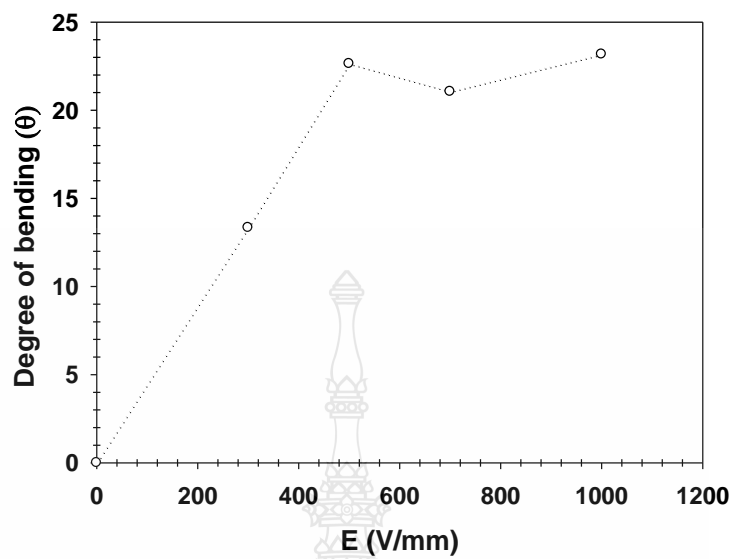
เพื่อศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าต่อองศาการบิดงอของยางสังเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าองศาการบิดงอเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.14



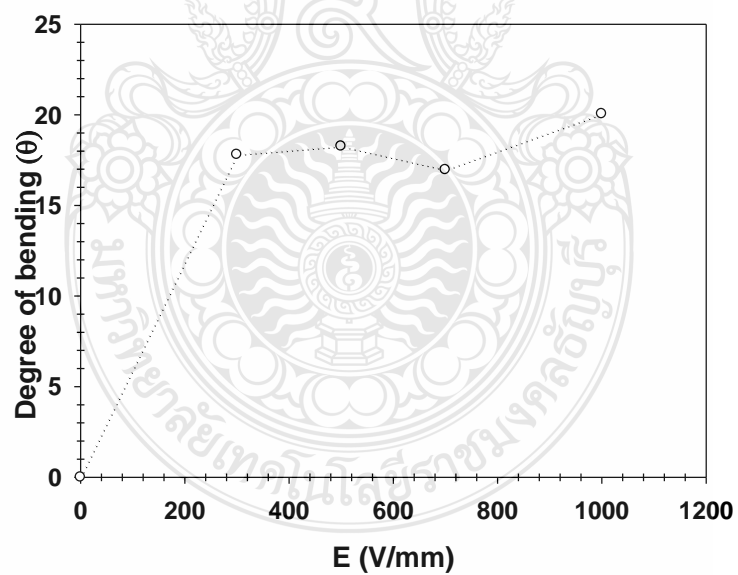
รูปที่ 4.7 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง SAR



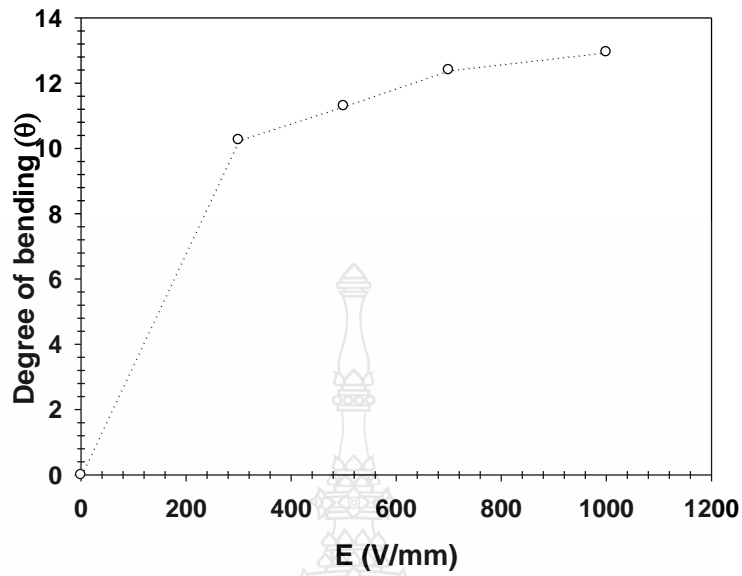
รูปที่ 4.8 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง AR



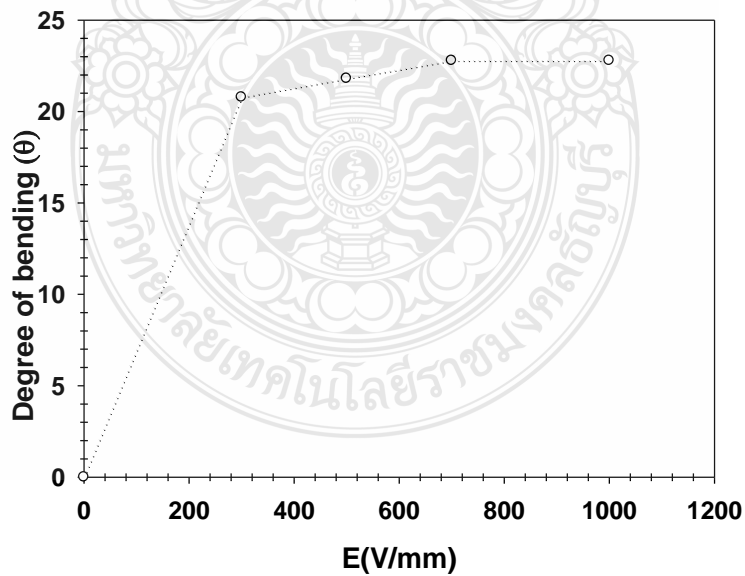
รูปที่ 4.9 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง SBR



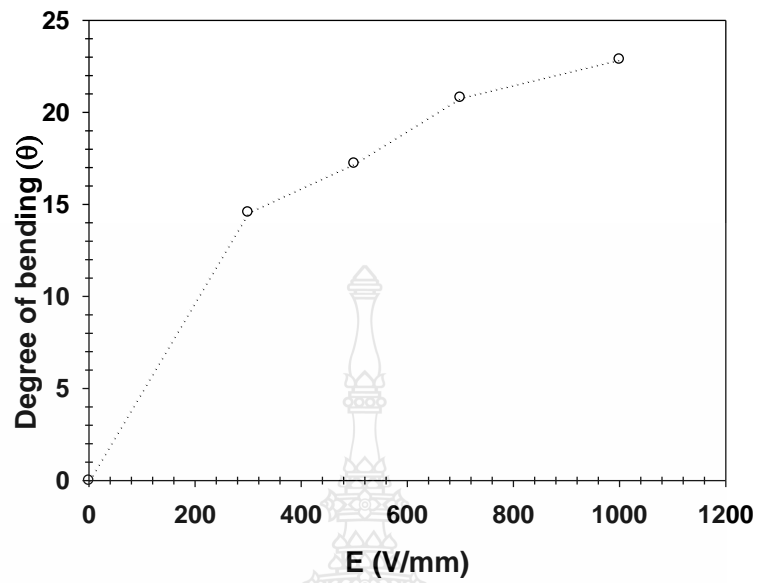
รูปที่ 4.10 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง BR



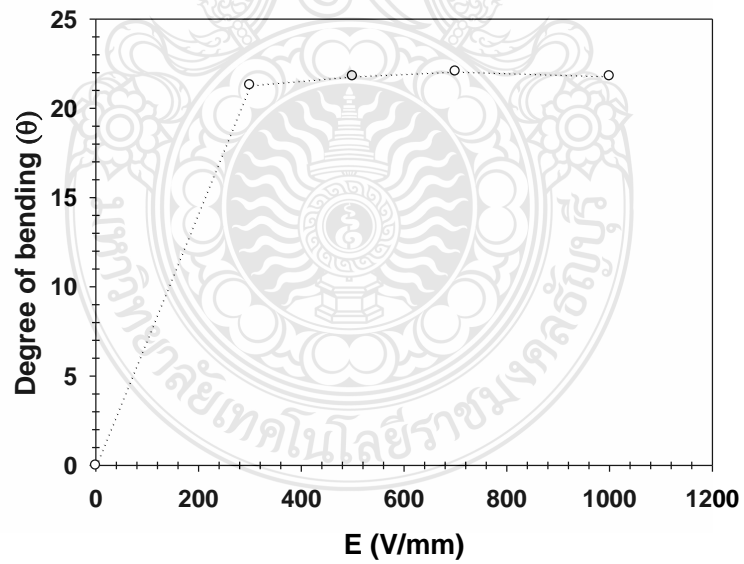
รูปที่ 4.11 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง SBS



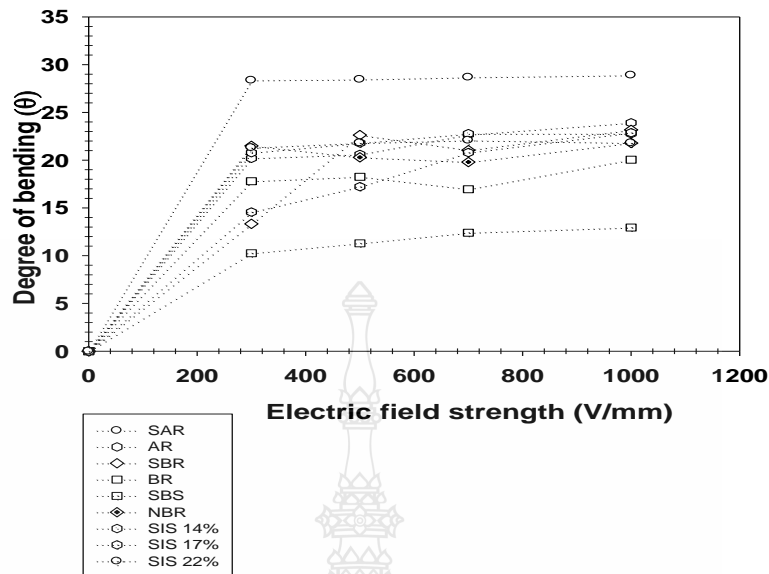
รูปที่ 4.12 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง SIS 14%



รูปที่ 4.13 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง SIS17%



รูปที่ 4.14 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยาง SIS22%



รูปที่ 4.15 องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ชนิดต่าง

จากรูปที่ 4.7 – 4.14 พบว่ายางสังเคราะห์ทุกตัวเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า องศาการบิดงอก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก หมู่ฟังก์ชันในยางสังเคราะห์ถูกโพลาริซ์เมื่อมีการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วอิเล็กโตรดและไดโพลโมเมนต์ของยางสังเคราะห์ และเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้น พบว่าองศาการบิดงอก็เพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะเมื่อเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้าไดโพลโมเมนต์ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามากขึ้นด้วยทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้นระหว่างไดโพลโมเมนต์และขั้วอิเล็กโตรด โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของสุมนมาลย์ นิยมกลางและคณะ[26]ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าต่อองศาของการบิดงอของยางธรรมชาติโดยพบว่าชิ้นงานยางธรรมชาติสามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าโดยปลายของชิ้นทดสอบเกิดการโค้งงอเข้าสู่แผ่นอิเล็กโตรดที่เป็นขั้วบวก ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันและจุดเชื่อมขวางถูกโพลาริซ์เมื่อมีการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้เกิดการจัดเรียงของไดโพลโมเมนต์ ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วอิเล็กโตรดและไดโพลโมเมนต์ของยางธรรมชาติที่เกิดขึ้นและเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้นพบว่าองศาการบิดเพิ่ม

4.5 ผลการคำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force, F_D)

เพื่อคำนวณแรง (Dielectrophoresis force, F_D) ขึ้นงานกฎวัดการตอบสนองการบิดงอและวัดค่ามอดูลัสสะสมภายใต้การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าแล้วนำผลการทดสอบมาคำนวณแรง (Dielectrophoresis force, F_D) ด้วยสมการที่ (2.17-2.19)

$$V(y=0,x=0) = \frac{Fdl^3}{3EI} = d \quad (2.17)$$

$$F_D = mg \sin \theta + F_d \quad (2.18)$$

$$F_d = \frac{d(3ED)}{l^3} \quad (2.19)$$

- เมื่อ
- V คือ ระยะทางของการบิดงอสุดท้าย
 - E คือ ค่ายังมอดูลัส มีค่าเท่ากับ $2G(1+\nu)$
 - G คือ ค่ามอดูลัสเฉือน ($\omega = 1 \text{ rad/s}$)
 - I คือ ค่าโมเมนต์ของอินินเซีย ซึ่งมีค่า $= \frac{1}{12} + t^3 w$
 - t คือ ค่าความหนาของยางสังเคราะห์
 - w คือ ค่าความกว้างของยางสังเคราะห์
 - l คือ ค่าความยาวยางสังเคราะห์

ดังแสดงค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 จำนวนแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส(Dielectrophoresis force, F_D)

Sample	E (V/mm)	θ	d(m)	l^3 (m)	$I = (1/12)t^{3w}$	$mgsin\theta$	F_d (N) $\times 10^{-4}$	F_D (N)
SAR t = 2 mm	300	28.36	2.04×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	2.14	1.07	2.14
w = 5mm	500	28.36	2.03×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	2.15	1.01	2.15
l = 60 mm	700	28.67	2.02×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	2.16	0.97	2.16
m = 0.46 g	1000	28.89	2.02×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	2.17	0.97	2.17
AR t = 2mm	300	20.2	2.54×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	1.48	1.03	1.48
w = 5mm	500	20.6	2.43×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	1.51	0.98	1.51
l = 60mm	700	22.68	2.26×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	1.52	0.92	1.52
m (g) = 0.44g	1000	23.9	2.16×10^{-2}	0.006	3.35×10^{-12}	1.74	0.88	1.74



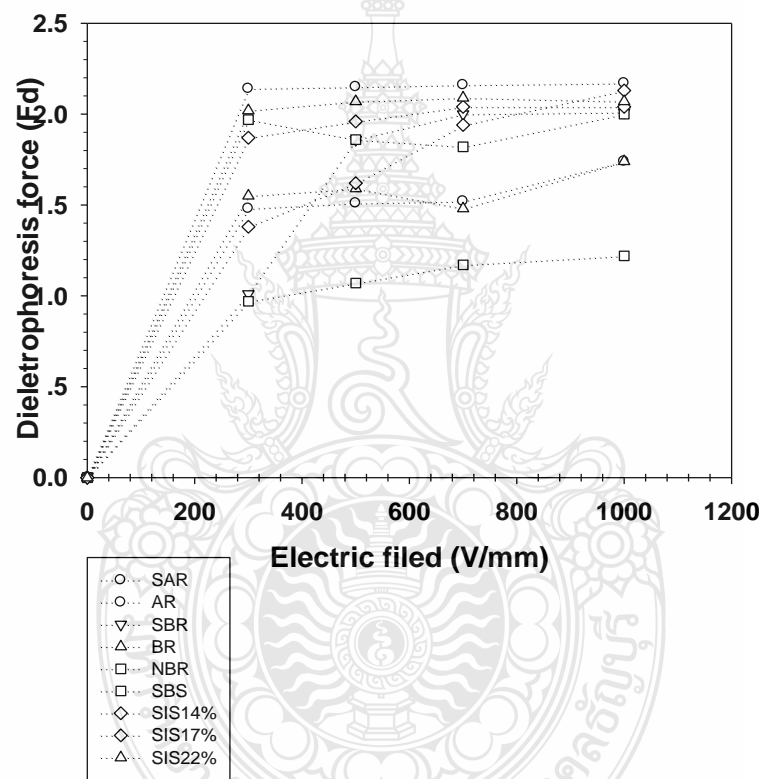
ตารางที่ 4.5 คำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส(Dielectrophoresis force, F_D)ต่อ

Sample	E (V/mm)	θ	d(m)	Γ^3 (m)	I = (1/12)+t ^{3w}	mg sin θ	F_d (N)x10 ⁻⁴	F_D (N)
SBR t = 3 mm	300	13.33	2.68 x10 ⁻²	0.006	1.12 x 10 ⁻¹¹	1.01	1.25	1.01
w = 5mm	500	22.63	2.58 x10 ⁻²	0.006	1.12 x 10 ⁻¹¹	1.86	1.2	1.86
l = 60 mm	700	21.05	2.3 x10 ⁻²	0.006	1.12 x 10 ⁻¹¹	2	1.1	2
m (g) = 0.51g	1000	23.17	2.11 x10 ⁻²	0.006	1.12 x 10 ⁻¹¹	2.01	0.98	2.01
BR t = 2 mm	300	17.8	2.14 x10 ⁻²	0.006	3.35 x 10 ⁻¹²	1.55	0.16	1.55
w = 5 mm	500	18.26	2.06 x10 ⁻²	0.006	3.35 x 10 ⁻¹²	1.59	0.16	1.59
l 60 mm	700	16.96	2.00 x10 ⁻²	0.006	3.35 x 10 ⁻¹²	1.48	0.15	1.48
m (g) = 0.52g	1000	20.05	2.00 x10 ⁻²	0.006	3.35 x 10 ⁻¹²	1.74	0.15	1.74
NBR t = 3mm	300	21.5	2.65 x10 ⁻²	0.006	1.12x10 ⁻¹¹	1.97	1.84	1.97
w = 5mm	500	20.3	2.20 x10 ⁻²	0.006	1.12 x 10 ⁻¹¹	1.86	1.53	1.86
l = 60 mm	700	19.8	2.18 x10 ⁻²	0.006	1.12 x 10 ⁻¹¹	1.82	1.52	1.82
m (g) = 0.55g	1000	21.8	2.15 x10 ⁻²	0.006	1.12x10 ⁻¹¹	2	1.49	2

ตารางที่ 4.5 คำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส(Dielectrophoresis force, F_D)ต่อ

Sample	E (V/mm)	θ	d(m)	Γ^3 (m)	$I =$ $(1/12)+t^{3w}$	$mg\sin\theta$	F_d (N) $\times 10^{-4}$	F_D (N)
SBS t = 3 mm	300	10.26	1.71×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	0.97	1.15	0.97
w = 5 mm	500	11.3	1.75×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.07	1.18	1.07
l = 60mm	700	12.4	1.95×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.17	1.32	1.17
m (g) = 0.56g	1000	12.95	2.36×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.22	1.59	1.22
SIS 14 %t = 3 mm	300	20.78	2.70×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.87	2.59	1.87
w = 5 mm	500	21.8	2.54×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.96	2.43	1.96
l = 60mm	700	22.78	2.21×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.04	2.12	2.04
m (g) = 0.54g	1000	22.78	2.25×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.04	2.16	2.04
SIS 17%t = 3 mm	300	14.57	2.81×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.38	4.36	1.38
w = 5 mm	500	17.22	2.65×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.62	4.11	1.62
l = 60mm	700	20.8	2.32×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	1.94	3.59	1.94
m (g) = 0.56g	1000	22.87	2.36×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.13	3.66	2.13
SIS 22%t = 3 mm	300	21.3	2.91×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.02	2.62	2.02
w = 5 mm	500	21.8	2.15×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.07	2.47	2.07
l = 60mm	700	22.07	2.42×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.09	2.17	2.09
m (g) = 0.57g	1000	21.8	2.46×10^{-2}	0.006	1.12×10^{-11}	2.07	2.21	2.07

โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันแก่ยางสังเคราะห์กับอนุภาคโพลาลิซ จะเกิดการโพลาลิซของอนุภาคโพลาลิซ เรียกว่า ไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ซึ่งไดโพลโมเมนต์นี้ก่อให้เกิดแรงดึงหรือผลกอนุภาคให้เคลื่อนที่ เรียกว่าแรง ไดอิเล็กโตรโฟเรติก (Dielectrophoretic force, F_D) จากตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแรงไดอิเล็กโตรโฟเรซิส (Dielectrophoresis force, F_d) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดจากแรงดึงหรือแรงผลักของอนุภาคโพลาลิซภายในเมทริกซ์



รูปที่ 4.16 แรงไดอิเล็กโตรโฟเรซิส ของยางสังเคราะห์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ต่อสมบัติไฟฟ้าเชิงกล ได้มีการดำเนินการจัดทำโครงการได้สำเร็จลุล่วง โดยผลของการจัดทำโครงการนั้นทำให้ได้ข้อสรุปต่างๆ ดังนี้

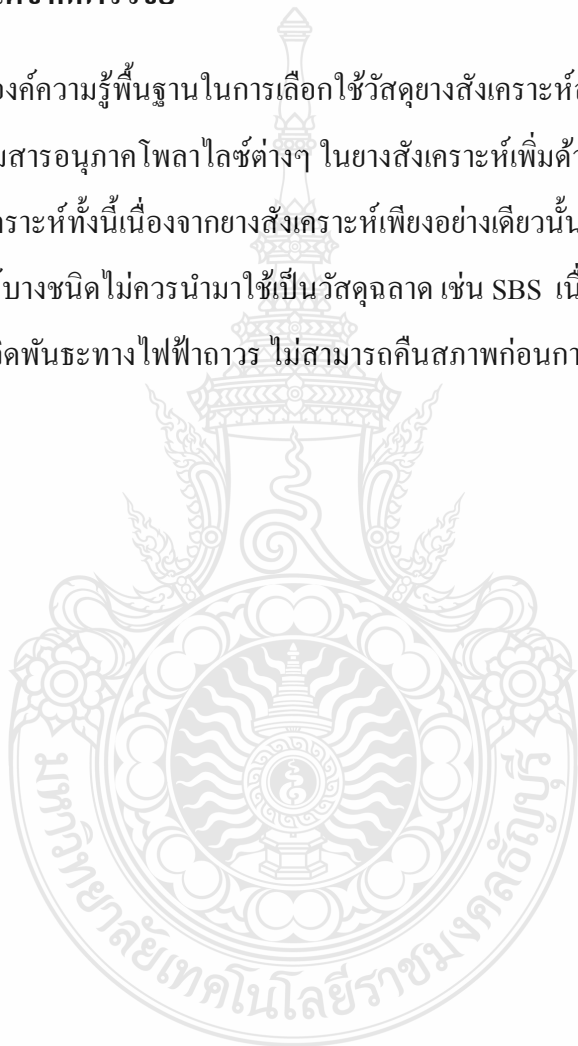
5.1 สรุปการวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของระบบยางสังเคราะห์ต่อการตอบสนองไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าภายนอก โดยยางสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา คือ SAR, AR, SBR, NBR, SBS, BR, SIS14%, SIS17%, SIS22% เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกความเข้ม 0- 1500 V/mm ยางสังเคราะห์เกิดการบิดงอไปทางขั้วบวก เนื่องจาก เกิดการจัดเรียงของไดโพลโมเมนต์ ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและไดโพลโมเมนต์ต้องการบิดงอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กระตุ้น เพราะ เมื่อเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้า ไดโพลโมเมนต์ของหมู่ฟังก์ชันก็มากขึ้นด้วยทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้นระหว่างไดโพลโมเมนต์และขั้วอิเล็กโทรดโดยเมื่อหยุดการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ยาง SIS14%, SIS17%, SIS22% กลับสู่สภาพเดิมก่อนกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายใน 3-10 วินาที แต่ยาง SAR, AR, SBR, NBR, SBS, BR ไม่สามารถกลับสู่ที่จุดเริ่มต้นได้ เนื่องจาก ยังมีแรงดึงดูดระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่อทองแดง โดยการบิดงอของชิ้นงานเมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอกนั้นก่อให้เกิดแรงทางไฟฟ้า คือ แรงไดอิเล็กโทรโฟเรซิส (Dielectrophoresis force, F_d) เมื่อมีการการคำนวณแรงไดอิเล็กโทรโฟเรซิส ผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าแรงไดอิเล็กโทรโฟเรซิส (Dielectricphoesis force) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดจากแรงดึงหรือแรงผลักของอนุภาคโพลาร์ไลซ์ภายในเมทริกซ์ ซึ่งพบว่า ยางชนิด SAR มีแรงไดอิเล็กโทรโฟเรซิสที่สูงสุดนอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของยางสังเคราะห์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กโทรต่างกัน เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยสมบัติเชิงกลนั้นถูกศึกษาในช่วง Linear viscoelastic ช่วงความถี่ 0.1-100 rad/s จากการทดสอบค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) ของยางสังเคราะห์ พบว่าค่าสตอร์เจมอดูลัสสูงขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก เกิดการโพลาร์ไลซ์ของโมเลกุลของกลุ่มที่มีขั้วในโครงสร้าง ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ ขึ้น และเกิดพันธะทางไฟฟ้าระหว่างไดโพลโมเมนต์ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้วัสดุเสียสภาพ ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) สูงขึ้น

ดังนั้นการการศึกษาผลของสมบัติทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ต่อสมบัติไฟฟ้าเชิงกลของยางสังเคราะห์ทั้ง 7 ชนิด พบว่า ค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าการบิดงอ SAR ดีที่สุดและมีค่าการเก็บประจุมากที่สุด และมีแรงบิด มากที่สุด เหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้าใช้ในอุปกรณ์ฉลาด

5.2 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

เพื่อให้เกิดองค์ความรู้พื้นฐานในการเลือกใช้วัสดุยางสังเคราะห์สำหรับเป็นวัสดุฉลาดนั้น ควรมีการศึกษาการเติมสารอนุภาคโพลีไลซ์ต่างๆ ในยางสังเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อเพิ่มการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ทั้งนี้เนื่องจากยางสังเคราะห์เพียงอย่างเดียวนั้นยังให้การตอบสนองที่ต่ำอยู่ และยางสังเคราะห์บางชนิดไม่ควรนำมาใช้เป็นวัสดุฉลาด เช่น SBS เนื่องจากเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าแล้วเกิดพันธะทางไฟฟ้าถาวร ไม่สามารถคืนสภาพก่อนการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกได้



บรรณานุกรม

- [1] Shankar,R., Ghosh,T., and Spontak,R. (2007). **Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators. Vol.3 : Journal of Soft Matter.** (pp. 1116-1129)
- [2] Federico,C. Danilo,R. Roy,K. Ronald,P. and Peter,L. (2008). **Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers:** Netherlands
- [3] คณาจารย์และนิสิต ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, **Shape memory alloy.** สืบค้นจาก <http://www.mic.eng.ku.ac.th/materials-resources>
- [4] บุญรักษา กาญจนวรวณิชย์. (2551). **ไทเทเนียม ยอดโลหะอุตสาหกรรม.** สืบค้นจาก <http://www.mtec.or.th/>
- [5] นิตยารณ สืบตระกูล "การผลิตสารประกอบระหว่างโลหะนิกเกิล-ไทเทเนียมด้วยวิธีเชิงกล" คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2544, 11- 19 สืบค้นจาก www.memory-metalle.de
- [6] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง, ถาวร สุวรรณกิจ. (2552). **ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและการประยุกต์ใช้ งาน.** สืบค้นจาก http://www.sci.kmutnb.ac.th/sci /PIEZO_ELECTRIC
- [7] Prof. dr. JanezDolinšek. (2007). **Shape memory alloys.** สืบค้นจาก http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2006_2007/SMA.pdf
- [8] Nyeka Lee. (2011). **Nobel Prize Winner Gabriel Lippmann 1908.** สืบค้นจาก <http://sphsdevilphysics.weebly.com/uploads>
- [9] Niamlang,S., and Sirivat,A. (2008). **Dielectrophoresis force and deflection of electroactive poly(phenylenevinylene)polydimethylsiloxane Blends.** Vol.17 Journal of Smart Materials and Structures

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Nyeka Lee. (2011). **Nobel Prize Winner Gabriel Lippmann** 1908. สืบค้นจาก <http://sphsdevilphysics.weebly.com/uploads>
- [11] Moulson, A. J. and Herbert., J. M., (1990). **Electroceramics Materials Properties Application**. (2nd ed). London, England: John Wiley & Sons
- [12] Peter Dargie, Russell Sion, John Atkinson. (1998). **An investigation of the effect of poling conditions on the characteristic of screen-printed piezoceramics**. Microelectrons International Journal
- [13] Hu, J., Xu, F., Huang, A.Q. & Yuan, F.G. (2011). **Optimal Design of a Vibration-based Energy Harvester Using Magnetostrictive Material (MsM)**. Smart materials and Structures, North Carolina State University.
- [14] จุฑาธิป คุณาสวรรค์. (2554). รายงานการสืบค้นข้อมูลความก้าวหน้าและสถานภาพเทคโนโลยี เพื่อการพัฒนาและการผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา. สืบค้นจาก <http://www.most.go.th/main/attachments/>
- [15] วราภรณ์ ขจรไชยกูล.(2555) เทคโนโลยีน้ำยาง Latex Technology :ประเทศไทย.สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- [16] Niamlang,S., and Sirivat,A. (2008). **Dielectrophoresis force and deflection of electroactive poly(phenylenevinylene)polydimethylsiloxane Blends**. Vol.17 Journal of Smart Materials and Structures.
- [17] Federico,C. Danilo,R. Roy,K. Ronald,P. and Peter,L. (2008). **Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers**: Netherlands
- [18] Puvanattvattana, T., Chotpattananont, D., Hiamtup, P., Niamlang, S., Kunanuruksapong, R., Sirivat, A., and Jamieson,A.M.(2008). **Electric field induced stress moduli of polythiophene/polyisoprene suspensions: Effects of particle conductivity and**

concentration. Vol.28 : Journal of Materials Science and Engineering C. (pp.119-128)

[19] **Electroactive material.** สืบค้นจาก <http://www.springer.com/chemistry>

[20] S. Niamlang, A. Sirivat, **Dielectrophoresis force and deflection of electroactive poly(phenylenevinylene)/polydimethylsiloxane Blends** , Smart Materials and Structures, accepted to be publish.

[21] Kunanuruksapong, R., and Sirivat, A. (2011). **Effect of dielectric constant and electric field strength on dielectrophoresis force of acrylic elastomers and styrene copolymers.** Vol.11: Journal of Current Applied Physics. (Pages 393–401)

[22] Liu, Y., Fanga, F., Choi, H., and Seo, Y. (2011). **Fabrication of semiconducting polyaniline/nano-silicananocomposite particles and their enhanced electrorheological and dielectric characteristics.** Vol.381 : Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. (pp. 17–22)

[23] Mutlu,R., Alici,G., Xiang,X., and Li,W. (2014). **Electro-mechanical modelling and identification of electroactive polymer actuators as smart robotic manipulators.** Vol.24 : Journal of Mechatronics. (pp.241-251)

[24] Waltma R.J. (2012) ผลของโครงสร้างของพอลิเมอร์ต่อพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์

[25] Kunanuruksapong, R., and Sirivat, A. (2009) **Effect of dielectric constant and electric field strength on dielectrophoresis force of acrylic elastomers and styrene copolymers**

[26] สุนนมาลย์ เนียมกลาง, สันติ ทองไชยและนิภาภรณ์ ภวนานันท์ (2008). ผลของไฟฟ้ากระแสตรง ต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติ



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Industrial Engineering Department
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

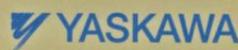
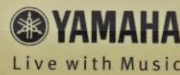
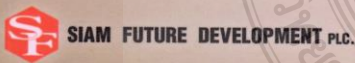


การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

IE NETWORK CONFERENCE 2014

30-31 October 2014
Novotel Suvarnabhumi Airport Hotel
www.ienet-th.org

Diversifying Industrial Engineering
for Future Generation



สารบัญบทความ (เรียงตาม Paper ID)

Paper ID	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	หน้า
230	ผลของขนาดยาต่อการแพร่ออกจากพอลิอะครีลาไมด์ไฮโดรเจลสำหรับประยุกต์ใช้ในงาสนำส่งยาผ่านผิวหนังควบคุมด้วยไฟฟ้า	สุนทรี นาคแท้ สุนนมาลย์ เนียมกลาง	70
233	การประเมินท่าทางการทำงานและอัตราความชุกของอาการผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกจากการทำงานในผู้ประกอบการอาชีพนวดแผนไทย	คมกฤต เมฆสกุล ไพลิน เผือกประคอง อารีสร กัญจนศิลาพันธ์	71
235	การพัฒนาความสามารถในการผลิตโดยใช้เวลามาตรฐานและการออกแบบเพื่อการประกอบ กรณีศึกษา โรงงานผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า	อรุณวรรณ จิตสำราญ อรรถกร เก่งพล	72
238	การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋องในจังหวัดเชียงใหม่	พีระญาณ งามสอาด ปณณมี สัจจกมล	73
243	การศึกษาเปรียบเทียบเอกซโพเซอร์ชาร์ตสำหรับการฉายรังสีเอกซ์เรย์แบบพัลส์และแบบทั่วไปในการตรวจสอบถ่ายภาพรังสีแบบดิจิทัล	ยุทธวีร์ สัมมาธิรัชย์ บวรโชค ผู้พัฒน์ สมพร เพียรสุขมณี	74
244	การลดของเสียในกระบวนการผลิตรองเท้าแฟชั่นชนิดเอทีเอ็นไวนิลอะซิเตท	ปณิศา คินดี	75
245	การลดของเสียในกระบวนการผลิตหม้อหุงข้าว	ปณิศา คินดี	76
247	การปรับความสมดุลการหมุนของดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	เกศรินทร์ บรรลุศิลป์ สมชาย พัวจินดาเนตร	77
250	การพัฒนาารเซ็นเซอร์เพื่อการตรวจสอบการย้ายตัว ขึ้น ลง	ฉกาจ เชื้อดี สุรพจน์ วัชรโรภากุล	78
251	การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์สำหรับโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย	สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง วรพงศ์ บุญช่วยแทน จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล วรรณพร ชีววุฒิพงศ์	79
252	The Forecasting Demand of Cassava Products of Thailand for Export Markets by Time Series and Artificial Neural Networks	Natthaya Choosuk Athakorn Kengpol	80
253	ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้าของอีลาสโตเมอร์ใช้เป็นวัสดุสำหรับแอคทูเอเตอร์	นภานันท์ บุญชู สุนนมาลย์ เนียมกลาง	81

ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้าของอีลาสโตเมอร์ใช้เป็นวัสดุ
สำหรับแอกทูเอเตอร์

Effect of Electrical Voltage on Electromechanical Properties
of Elastomer for Actuator Materials

นพนันท์ บุญชู¹ และสมณมณาลย์ เนียมหลวง²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 02 549 3558

E-mail: sumonman.n@en.rmutt.ac.th

Nopanan Boonchu¹ and Sumonman Naimlang²

^{1,2}Department of Material and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110

E-mail: sumonman.n@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากตัวจ่ายไฟด้านภายนอกต่ออีลาสโตเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการเก็บประจุไม่เท่ากัน คือยางสไตรีนอะคริลิก (SAR) ยางอะคริลิก (Acrylic latex) ยางธรรมชาติ (Natural rubber) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane) สำหรับเป็นวัสดุประยุกต์ใช้ในงานแอกทูเอเตอร์การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกต่อการของขึ้นงานนั้นทำโดย นำชิ้นงานขนาด กว้าง x ยาว x หนา 0.5 x 6 x 0.2 มิลลิเมตร จุ่มระหว่างชั้นแผ่นทองแดงในน้ำมันซิลิโคน ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 300, 500, 700 และ 1000V/mm จากผลการทดลองพบว่าเมื่อกระตุ้นชิ้นงานด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ชิ้นงานเกิดการบิดงอปลายเข้าหาขั้วบวก และเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า องค์การบิดงอของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อนำการของขึ้นงานมาคำนวณแรงที่เกิดขึ้นก็พบว่า แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force) ที่เกิดขึ้นนั้นมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าจากภายนอกเมื่อเปรียบเทียบกับผลของความสามารถในการเก็บประจุของยาง พบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากัน ยางพอลิไดเมทิลซิลอกเซนก่อให้เกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิสมากกว่ายางธรรมชาติ ยางอะคริลิกและยางสไตรีนอะคริลิกตามลำดับหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปศึกษาสมบัติเชิงกลไฟฟ้า ในระบบที่มีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (1500 V/mm) และไม่มีกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (0 V/mm) ถูกนำไปทดสอบหาค่ามอดูลัสสะสม (Storage Modulus) ช่วงความถี่ คือ 0.1 - 100 rad/s ด้วยเครื่อง Parallel Plate Melt Rheometer ทำการทดลองในช่วง Linear Viscoelastic พบว่าเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก โมเลกุลของอีลาสโตเมอร์เกิดการโพลีไลซ์เชน และพยายามจะดึงดูดกันเอง ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำลายโครงสร้างเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก

คำหลัก สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าสไตรีนอะคริลิกกับเบอร์ยางอะคริลิก ยางธรรมชาติ และพอลิไดเมทิลซิลอกเซน





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล **ครั้งที่ ๖**

6th Electrical Engineering Network 2014
of Rajamangala University of Technology Conference
นวัตกรรมวิจัยแห่งเทคโนโลยี ตอบสนองเออีซีด้านโครงข่ายพลังงาน
Technology Research Innovation for Responding
to the Energy Network of AEC

๒๖ - ๒๘ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๕๗
ณ มาริไทม์ ปาร์คแอนสปาร์ตอร์ท จังหวัดกระบี่

บทความสาขาพลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)		หน้า
ES-C		
ES17	การออกแบบและประยุกต์ใช้งานต้นแบบโซลาร์เซลล์ในงานเกษตรกรรม รุ่งเพชร ก่องนอก รุ่งเรือง ริงไธสง อัครพล อินทร์หมื่นไวย ฤดีศติ อุทิศสุนทร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์	269
ES18	กรณีศึกษาการระบายความร้อนของหม้อแปลงขึ้นด้วยฮีทไปป์ สุทธินันท์ ดันโพธิ์ รุ่งเพชร ก่องนอก ธนพันธ์ อาจศึก วรารัตน์ ว่องปรัชญา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	273
ES19	การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ลิฟต์ชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธี บทความ การรีเจนเนอเรทีฟ ชเมย สิทธิชัย กันทะวงศ์ บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	277
ES20	การควบคุมการปลดปล่อยยานโซลิจจากหอดูดาวหอดูดาวโครเจล ผลของขนาดรูพรุน ความเข้มข้นไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้า สุนทรี นาคแท้ กฤษณ์ชนม์ ภูมิศักดิ์ทิพย์ สุมนมาลย์ เนียมกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	281
ES21	การจัดการและการควบคุมการใช้พลังงานสำหรับตู้ทำน้ำเย็น อิสริย์ วงศ์ศรีใส วิชัย สายศักดิ์กรณ กฤตวิทย์ บัวใหญ่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	285
ES22	การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของเครื่องปรับอากาศด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ศุภกฤษณ์ ศรีสุวรรณ ภาณุมาศ แสนพวง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	289
ES23	การศึกษาศักยภาพในการลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทโลหะประดิษฐ์ เครื่องจักร และอุปกรณ์ รัชฎาพร คำภู นาคยา กล้ายเรือง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	293
ES24	การศึกษาและปรับปรุงคุณภาพกระแสสำหรับหม้อแปลงอัลติ ชันนันท์ ลิ้มปะนะวิสัย กัปตัน ปวีร์วัฒน์ นรินทร์ วัฒนกุล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	297
ES-D		
ES25	การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้าของยางสังเคราะห์สำหรับใช้ในงาน แขนจักรกล นภนันท์ บุญชู สุมนมาลย์ เนียมกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	301

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้าของยางสังเคราะห์สำหรับใช้ในงานแขนจักรกล The Study of effect of Electrical Voltage on Electromechanical Properties of Synthesis Rubber for Robotic Arms

ณกันต์ บุญชู และศุมนมาลย์ นิยมกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 02 549 3558 E-mail: sumonman.n@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากตัวจ่ายไฟด้านนอกต่อยางสังเคราะห์ ชนิด (SAR และ Acrylic latex) เมื่อเป็นประจุที่ใช้ในงานแขนจักรกลอุตสาหกรรมและเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกคือการงอของชิ้นงานนั้นทำโดย นำชิ้นงานขนาด กว้างx ยาว x หนา 0.5 x 6 x 0.2 มิลลิเมตร จุ่มระหว่างขั้วแท่งทองแดงในน้ำมันซิลิโคน ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 300, 500, 700 และ 1000 V/mm จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น องศาการบิดของชิ้นยางสังเคราะห์ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลเกิดการโพลาไรซ์และเหนี่ยวนำขั้วลบไปหาขั้วบวกของอิเล็กโทรดทำให้เกิดการบิดงอขึ้นจึงเหมาะกับการประยุกต์ใช้เป็นแขนจักรกลอุตสาหกรรมและเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานที่ขึ้นรูปง่ายและราคาถูก

คำสำคัญ: SAR, Acrylic latex, การบิดงอ, แรงผลักรจากไฟฟ้า

Abstract

The effect of electric field strength on electromechanical response of synthetic rubber (SAR and Acrylic latex) was investigated in this research work. The bending response was studied by dipping synthetic rubber (0.5x6x0.2 mm) in silicone oil between copper electrode under 300, 500, 700 and 1,000 V/mm. The degree of bending increase with increasing electric field strength due to the electrostatic force between polarization of molecule and electrode. When the electric field strength increase, Thus this synthesis rubber is new class of material which can be used as robotic arm and energy harvest, field strength due to the dipole-dipole interaction between polarized particle and cathode electrode.

Keywords: SAR, Acrylic latex, bending response, electrostatic force

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฉลาด (Smart material) นั้นได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิศวกรรมและการแพทย์ เช่น แอคชูเอเตอร์ กล้ามเนื้อเทียม หุ่นยนต์ระบบนำส่งยา และ ระบบเซนเซอร์ โดยวัสดุตอบสนองไฟฟ้านั้นเป็นวัสดุฉลาดชนิดหนึ่ง โดยวัสดุชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลเมื่อมีแรงไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้น วัสดุตอบสนองไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนี้โดยมากทำมาจากที่โซอิเล็กทริก (Piezoelectric) อัลลอยด์ (Alloys) เซรามิก (Ceramic) และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

วัสดุฉลาด (intelligent materials) หรือบางครั้งเรียก วัสดุสมาร์ต (smart materials) คือ วัสดุที่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่มันทำงานอยู่ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นตามรูปแบบที่มีการกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าเหมือนพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต

วัสดุฉลาดประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนดังนี้

1. เซนเซอร์ (sensors) คือตัวที่ทำหน้าที่รับแรงกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อม

2. แอคชูเอเตอร์ (actuator) คือส่วนที่หน้าที่ตอบสนองและปรับเปลี่ยนรูปร่าง ตำแหน่ง ความถี่ธรรมชาติ หรือลักษณะเฉพาะทางกลอื่นๆ เพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า และหรือสนามแม่เหล็ก โดยทั่วไปมีวัสดุอยู่ 4 ประเภทที่ใช้ทำแอคชูเอเตอร์

1. โลหะผสมจำรูป (shape memory alloys) 2. เซรามิกที่เป็นที่โซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramics) 3. วัสดุเมกนีโตสตริกทีฟ (magnetostrictive materials) 4. อิเล็กโตรรีโอโลจิคอล หรือ แมกนีโตรีโอโลจิคอล (electrorheological/magneto-rheological fluids)[1-2]

ยางสังเคราะห์เป็นอีกหนึ่งในวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้าประเภทโพลีเมอร์ เมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก โมเลกุลภายในยางสังเคราะห์จะเกิดโพลาไรซ์เพิ่มขึ้นแล้วเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างไดโพลโมเมนต์ เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลค่าความเครียดและความเค้นของวัสดุเปลี่ยนไป สังเกตได้จากการบินงอของยางสังเคราะห์และความแข็งแรงของวัสดุ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

ในงานวิจัยนี้สนใจขึ้นรูปยางสังเคราะห์ SAR และ Acrylic latex เป็นยางสังเคราะห์ที่ราคาถูก ขึ้นรูปง่าย และมีสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่ายางสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติการตอบสนองเชิงกลไฟฟ้าของยางสังเคราะห์ทั้งสองเพื่อที่จะเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์กลอุณหภูมิต่อเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานที่ขึ้นรูปง่าย ราคาถูกและมีสมบัติเชิงกลที่ทนต่อสภาวะแวดล้อม

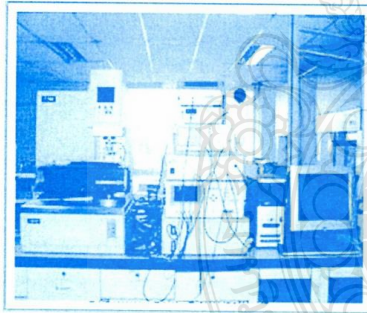
2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.1 การขึ้นรูปน้ำยางสังเคราะห์

เพื่อศึกษาผลของความหนาของชั้นงานต่อผลการตอบสนองการขึ้นรูปยางสังเคราะห์ที่มีความหนา 0.2 และ 0.5 mm ทำโดยเทยางสังเคราะห์คือ SAR และ Acrylic latex ลงในจานเพาะเชื้อ ปริมาตร 14 ml และ 16 ml แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 2-3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ความดันปกติตามลำดับ

2.2 การทดสอบสมบัติการตอบสนองเชิงกลไฟฟ้า

การวัดสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าภายนอกถูกวัดที่อุณหภูมิ 27 °C โดยเครื่อง Parallel Plate Rheometer (rheometric scientific Inc.ARES) ดังแสดงในรูปที่ 1 ชั้นงานถูกเตรียมมีขนาดความหนาประมาณ 1 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. มอดูลัสสะสม (Storage modulus), G' และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus), G''



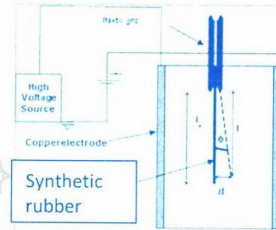
รูปที่ 1 parallel plate melt rheometer

2.3 การทดสอบการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้า

ภายนอก

การโค้งงอของวัสดุภายใต้กระแสไฟฟ้าเป็นการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้ากลอีกวิธีหนึ่งเป็นการศึกษาถึงความยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุเมื่อถูกกระตุ้นหรือเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องทดสอบนั้นจะใช้เซลล์ไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจากแผ่นอะคริลิกภายในเซลล์

ประกอบด้วยแผ่นทองแดง 2 แผ่นเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรด (Electrode) ขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตรและความยาว 30 มิลลิเมตรและมีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงทั้งสอง 30 มิลลิเมตรซึ่งแผ่นทองแดงถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) โดยขั้วทองแดงทั้งสองจะจุ่มในน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ที่มีความหนืด 100 cSt แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวัดการบิดงอที่มีการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกของเครื่องขึ้นงาน

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 สมบัติการตอบสนองเชิงกลไฟฟ้า

เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของยางชนิด SAR และ Acrylic latex ทั้งในระบบที่มีและไม่มีการกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าภายนอกนั้นยังถูกทดสอบค่า มอดูลัสสะสม (Storage modulus, G') เพื่ออธิบายพฤติกรรมของส่วนอีลาสติก และส่วนวิสคอสตามลำดับ ในระบบที่ไม่มีกระแสกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก พบว่าระบบการเชื่อมโยงค่ามอดูลัสสะสม ค่อนข้างสูงขึ้นเมื่อความถี่ของการบิดสูงขึ้น และค่ามอดูลัสสูง ค่อนข้างต่ำในตารางที่ 1 ทั้งนี้เนื่องมาจากที่คำนวณการขึ้นรูปแล้วนั้น มีลักษณะเป็นของแข็งอีลาสติก (Elastic) มากกว่าส่วนที่เป็นของไหล (Viscous) และเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกนั้นค่ามอดูลัสสะสม และ ค้างคงแสดงพฤติกรรมคล้ายกับระบบที่ไม่มีกระแสกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ในระบบของ SAR นั้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วนั้นค่ามอดูลัสสะสม นั้นจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าไม่เสถียรของยาง SAR เกิดพอลาไรเซชัน ขึ้นแล้วแต่จะไม่เสถียรเกิดการผลักกันทางไฟฟ้าทำให้แรงดึงดูดในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางนี้ แต่ในกรณีระบบของ Acrylic latex นั้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกเกิดปรากฏการณ์ตรงข้าม คือ พอลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเกิดการดึงดูดกันระหว่างสายโซ่ทำให้อัตราใช้แรงมากขึ้นในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางนี้ ดังแสดงค่า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

มอดูลัสสะสมของยางสังเคราะห์ทั้งสองทั้งในระบบที่มีและไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ความถี่ 10 rad /s		ความถี่ 100 rad /s	
	G'(Pa)	G''(Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)
SAR	0.4002	0.5007	0.55182	0.66248
Acrylic latex	0.1222	0.6324	0.2208	0.9698

ตารางที่ 1 ค่ามอดูลัสของยางสังเคราะห์ในระบบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า (E= 0V/mm)

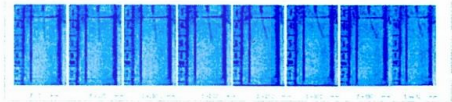
ตัวอย่าง	ความถี่ 10 rad /s		ความถี่ 100 rad /s	
	G'(Pa)	G''(Pa)	G' (Pa)	G''(Pa)
SAR	0.1246	0.1009	0.11155	0.1297
Acrylic latex	0.1903	0.6467	0.3160	0.1601

ตารางที่ 2 ค่ามอดูลัสของยางสังเคราะห์ที่มีระบบที่มีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า (E= 1000V/mm)

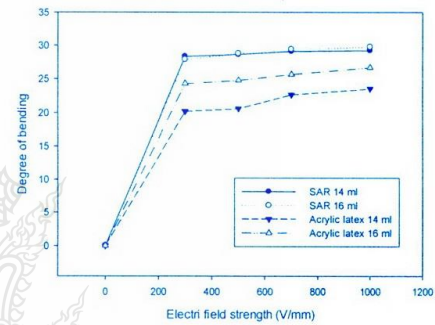
3. 2 ผลการวัดการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้าจากภายนอก

เพื่อศึกษาผลของการตอบสนองการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก ชิ้นงานยาง SAR และ Acrylic latex ในปริมาณ 14 ml (หนา 0.2 mm) และ 16ml (หนา 0.6 mm) เตรียมขึ้นเพื่อศึกษาการบิดงอภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 300, 500, 700 และ 1000V/mm ดังแสดงตัวอย่างการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกในรูปที่ 3 โดยพบว่าองศาการบิดงอนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้าภายนอก ชิ้นงานยางสามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าโดยปลายของชิ้นทดสอบเกิดการโค้งงอเข้าสู่แผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวกทั้งนี้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันและจุดเชื่อมขวางถูก โพลาริซ์เมื่อมีการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้เกิดการจัดเรียงของไดโพล โดมเนตต์ ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและไดโพล โดมเนตต์ของยางสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น และเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้น พบว่าองศาการบิดงอที่เพิ่มมา

ขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4 เพราะเมื่อเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้า ไดโพล โดมเนตต์ของหมู่ฟังก์ชันและจุดเชื่อมขวางก็มากขึ้นด้วยทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้นระหว่างไดโพล โดมเนตต์และขั้วอิเล็กโทรด [3-5]



รูปที่ 3 องศาการบิดงอของยางสังเคราะห์ SAR ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 300 V/mm



รูปที่ 4 ผลของความแรงของสนามไฟฟ้าต่อองศาการบิดงอของยางที่ปริมาณต่างๆ

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่ายางSAR และ Acrylic latex อย่างเดียวนั้นสามารถเป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้าได้ สามารถควบคุมองศาการบิดงอได้เมื่อควบคุมความเข้มของสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปง่าย มีราคาถูก แต่ระบบที่มีการเติมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าก็ยังคงต้องพัฒนาต่อไปเพื่อแก้ปัญหาการเกาะกลุ่มกันของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองทางไฟฟ้าของระบบผสม สำหรับใช้เป็นวัสดุในงานแอคทูเอเตอร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย Advanced Materials Research Group คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

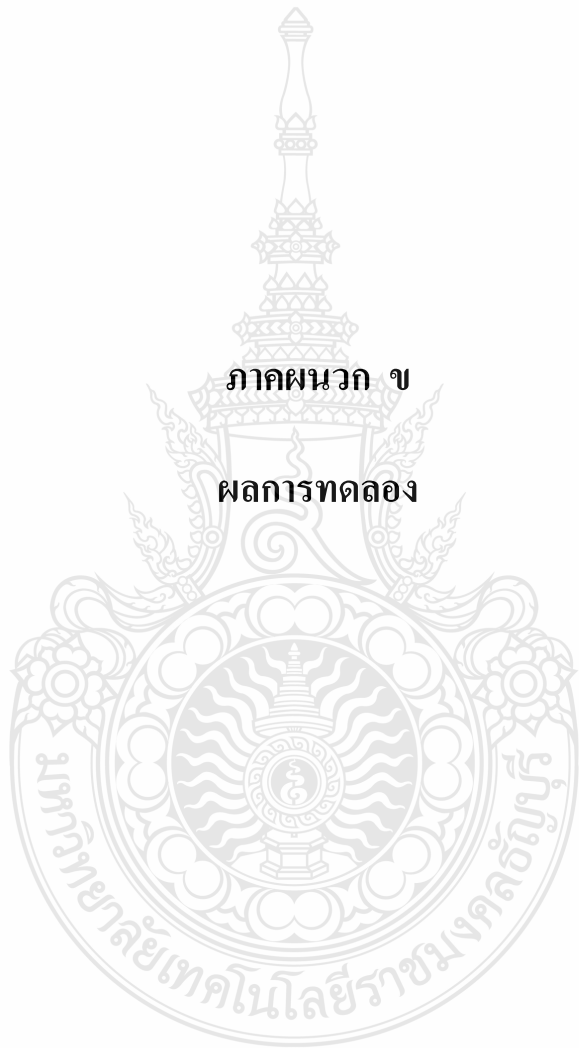
- [1] <http://th.wikipedia.org/wiki/วัสดุฉลาด>
- [2] G. Filipesci, J. Feher, M. Zrinyi, Electric field sensitive neutral polymer gels. *J. Mol. Struct.* 554, 109-117, 2000.
- [3] S. Niamlang, A. Sirivat, "Electromechanical responses of a crosslinked polydimethylsiloxane", *Macromolecular Symposia*, 264, 176-183, 2008.
- [4] J. Gere, S. Timashenko, "Mechanics of Materials" 3rd, Chapman & Hall, United Kingdom, 514 – 517, 1991
- [5] R. Gorur "Dielectrics in Electric Fields" Marcel Dekker Inc. New York 1-277, 2003



ประวัติผู้เขียนบทความ ดร. สุนนมาลัย เนียม
กลาง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ
และโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ความ
สนใจในงานวิจัยด้านวัสดุนำไฟฟ้า แอคทูเอ
เตอร์

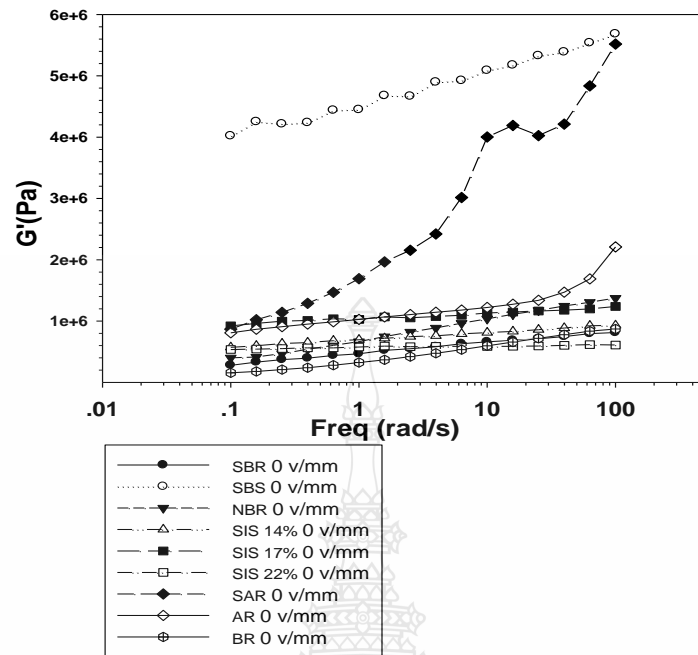


ประวัติผู้เขียนบทความ นาย นกนันทน์ บุญชู
นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและ
โลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มี
ความสนใจในงานวิจัยด้านวัสดุนำไฟฟ้า แอค
ทูเอเตอร์



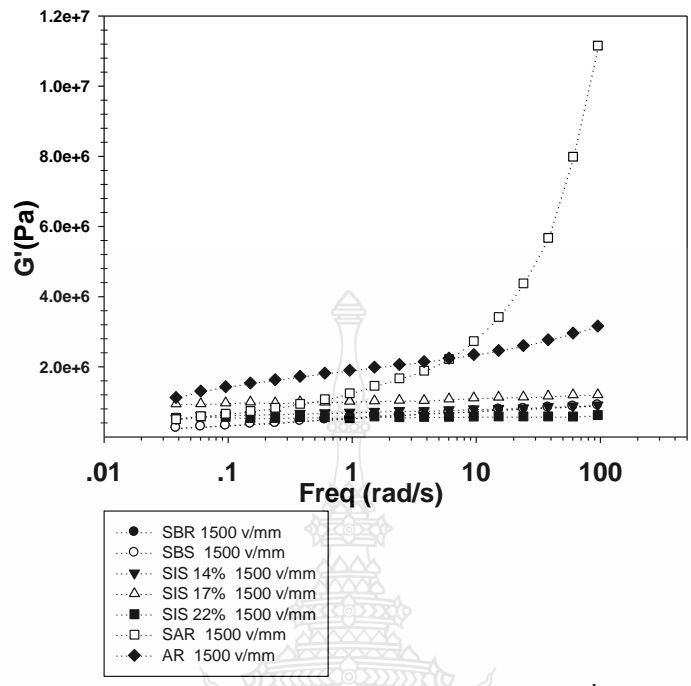
ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง



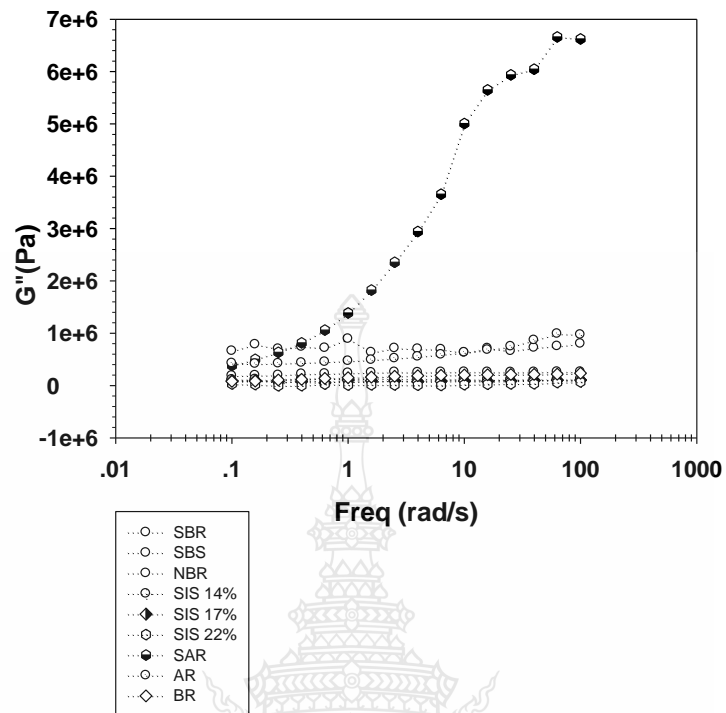
ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) ของยางธรรมชาติสังเคราะห์ ในระบบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 0 V/mm



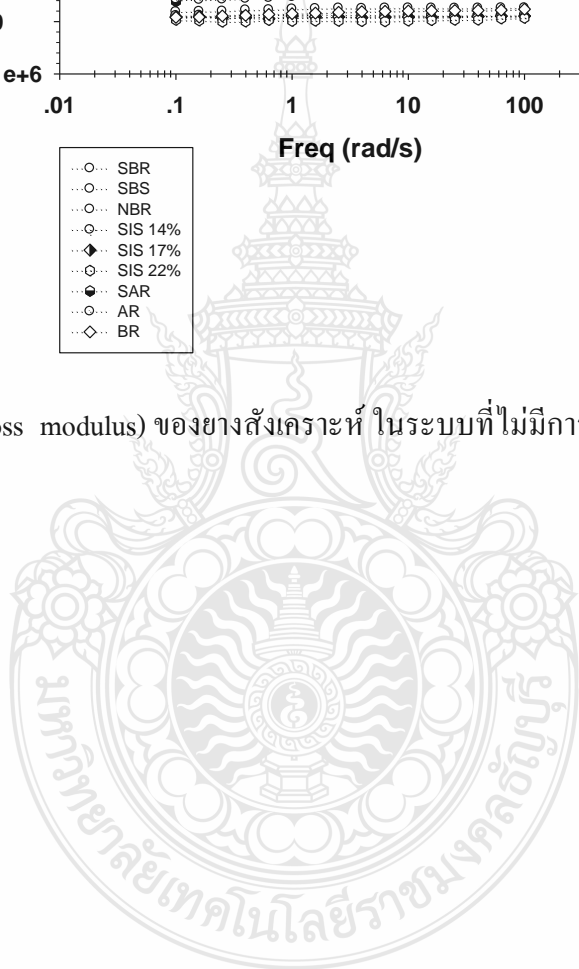


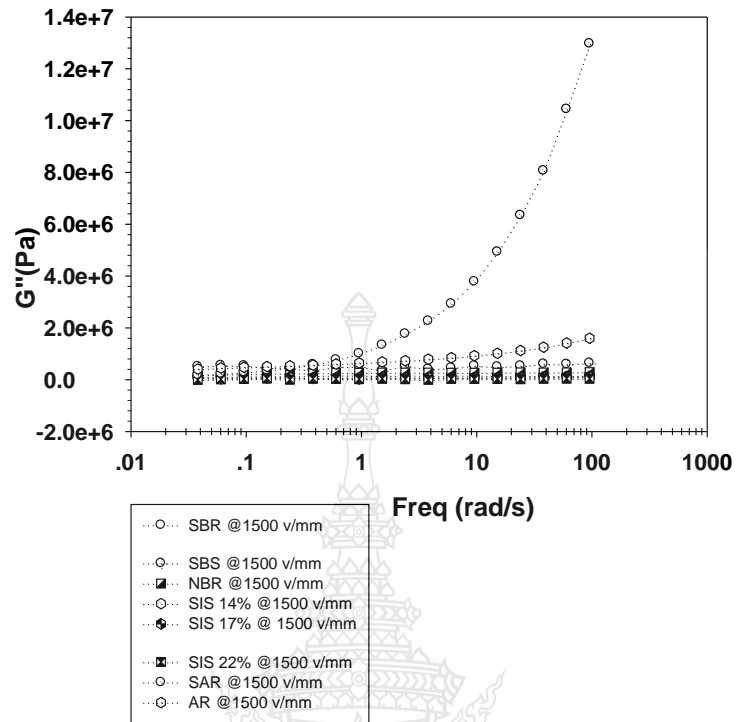
ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) ของยางสังเคราะห์ ในระบบที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 1,500 V/mm



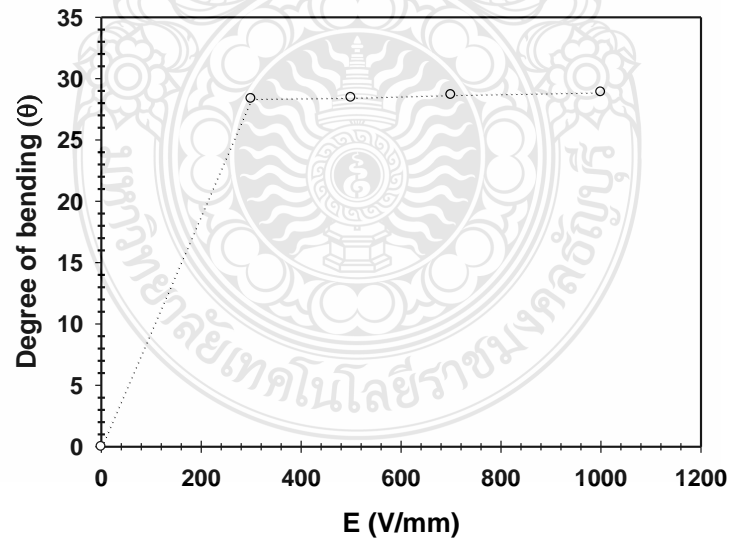


ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์ ในระบบที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 0 V/mm

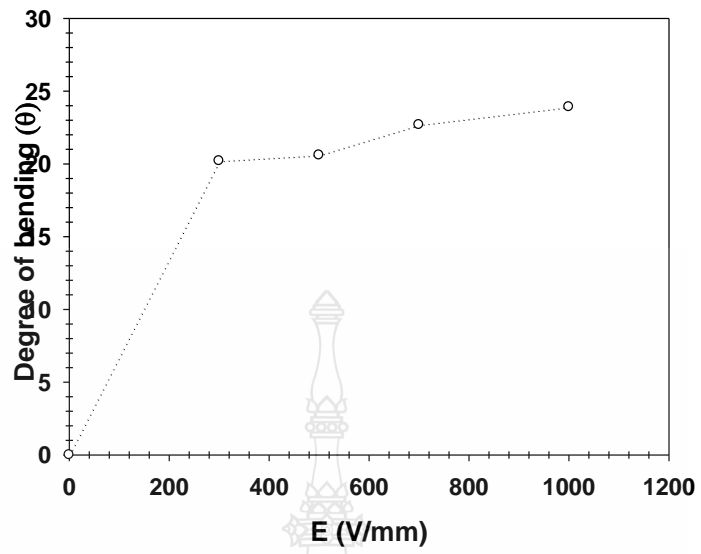




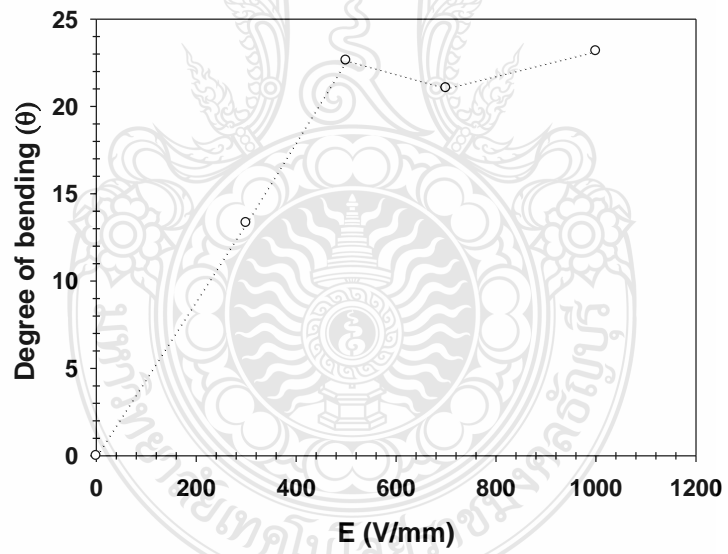
ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางสังเคราะห์ ในระบบที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 1500 V/mm



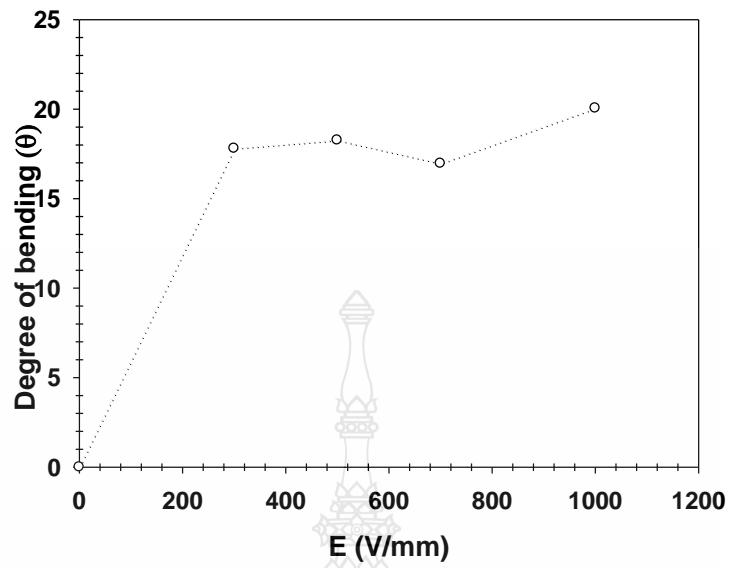
องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SAR



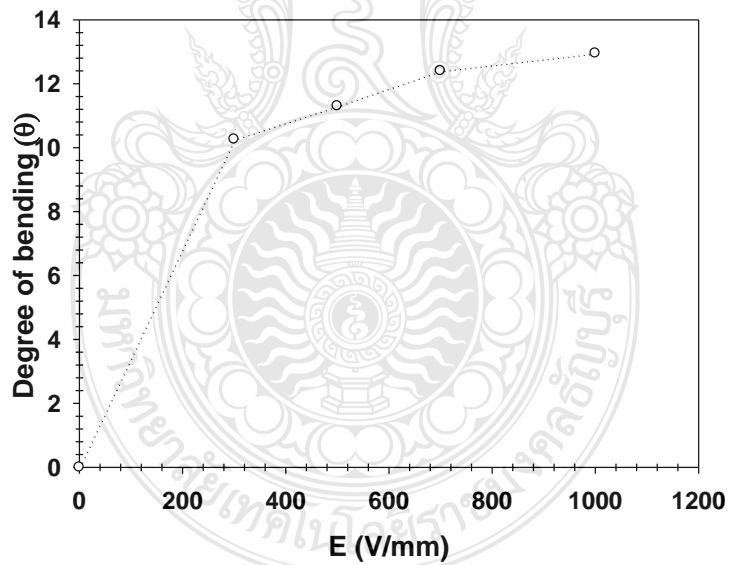
องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์AR



องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์SBR

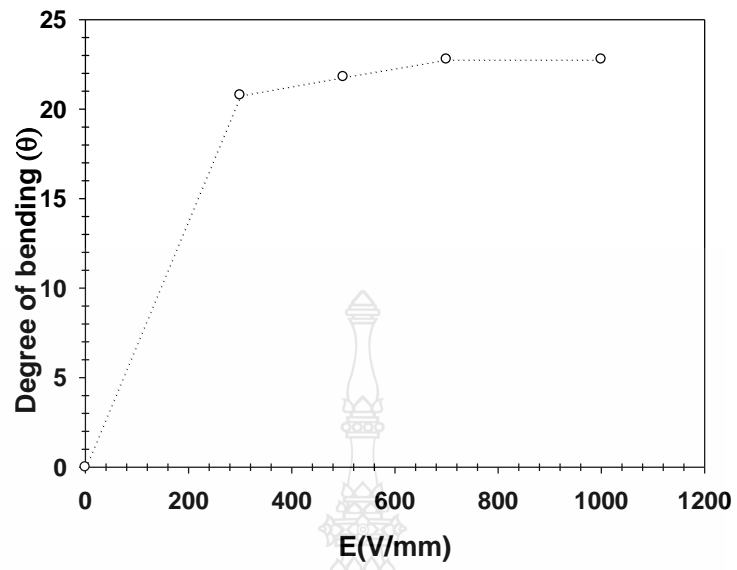


องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์BR

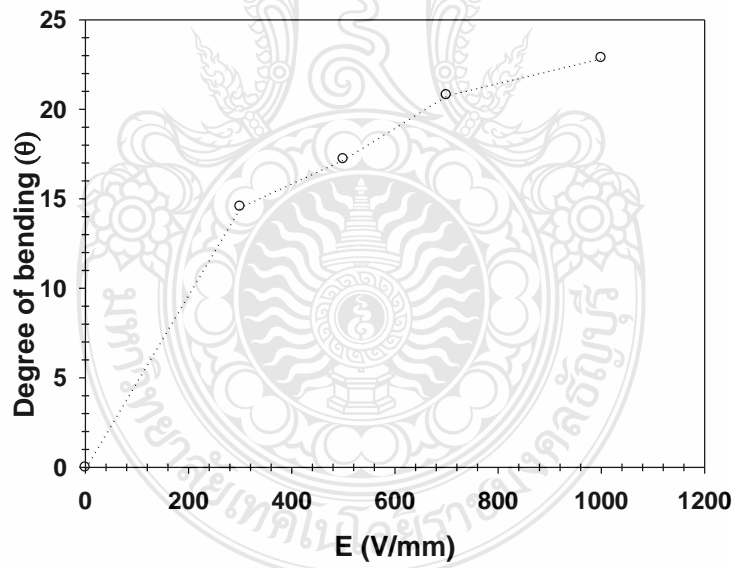


องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์

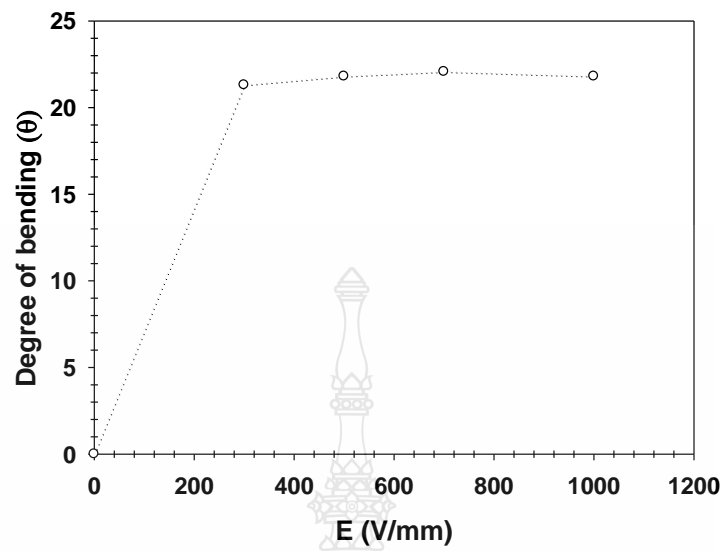
SBS



องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SIS 14%



องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SIS 17%



องศาการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อชิ้นงานยางสังเคราะห์ SIS22%



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นภนันท์ บุญชู
วัน เดือน ปีเกิด	1 กันยายน 2533
ที่อยู่	53/10 ซอยหนองขวน ตำบลทับเที่ยง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง 92000
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขา เคมีสิ่งทอ-การผลิตเส้นใย สังเคราะห์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	086-0074599

