

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาผลของชนิดอนุภาคพอลาไลซ์ และความเข้มข้นไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้าของยางคอมโพสิต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์ (เส้นใยนาโนลูโคซีน, เส้นใยนาโนอิมิไนต์, ท่อนาโนลูโคซีน และท่อนาโนอิมิไนต์) ซึ่งยางคอมโพสิตที่เตรียมนั้นจะเตรียมที่ปริมาณสารตัวเติมต่างๆ โดยสมบัติเชิงกลไฟฟ้านั้นจะเปลี่ยนไปเมื่อความแตกต่างระหว่างความสามารถในการนำไฟฟ้าของอนุภาคพอลาไลซ์และยางนั้นเปลี่ยนแปลงไป ยางคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้นั้นนำมาทดสอบสมบัติการตอบสนองเชิงกลไฟฟ้าภายใต้การกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า 0 – 1.5 kV/mm โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบขนาน (Parallel plates melt rheometer) ทุกการทดลองถูกควบคุมการทดสอบในช่วงของลิเนียร์วิสโคอีลาสติก (Linear viscoelastic regime) คือ ความถี่ในช่วงการวัด 0.1-100 รอบต่อวินาที และความเครียด 1%

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของยางสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้

เพื่อศึกษาสมบัติของยางสังเคราะห์ พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและยางสังเคราะห์ผสมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและอนุภาคพอลาไลซ์ ชิ้นงานถูกเตรียมโดยผสมโดยผสม (พอลิไดเมทิลไซลอกเซน, PDMS) 3.68 กรัม ผสมกับ (Tetra Ethylorthosilicate, TED) ซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางและผสม (Dibutyltin Dilaurate, Tin) 0.04 กรัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เมื่อขึ้นรูปแล้วชิ้นงานมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.1 และเพื่อศึกษาสมบัติของอนุภาคพอลาไลซ์ต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้า อนุภาคเส้นใยนาโนลูโคซีน, เส้นใยนาโนอิมิไนต์, ท่อนาโนลูโคซีน และท่อนาโนอิมิไนต์ ถูกผสมที่สัดส่วน (10% w/w) เมื่อขึ้นรูปแล้วชิ้นงานมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตาราง 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เตรียมได้

ตัวอย่าง	ลักษณะกายภาพ	รูป
PDMS1	เหนียว ใส นุ่ม ผิวเรียบ	
PDMS2	เหนียว ใส นุ่ม คล้ายเจล	
PDMS3	เหนียว ใส นุ่ม คล้ายเจล	
PDMS4	เหนียว ใส นุ่ม คล้ายเจล	
PDMS5	เหนียว ใส นุ่ม คล้ายเจลแข็ง	

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสม

ตัวอย่าง	ลักษณะกายภาพ	รูป
PDMS/Luecoxene Nanofiber	เหนียว ขาว นุ่ม	
PDMS/Luecoxene Nanotube	เหนียว นุ่ม มีสีน้ำตาลอ่อน	
PDMS/Ilmenite Nanotube	เหนียว นุ่ม มีสีน้ำตาลอ่อน	
PDMS/Ilmenite Nanofiber	เหนียว นุ่ม มีสีน้ำตาลเหลืองอ่อนๆ	

4.1.2 การบวมตัวของยางสังเคราะห์

เพื่อวิเคราะห์ผลของอัตราการเชื่อมโยงต่อคุณสมบัติเชิงกลของยางสังเคราะห์ในระบบที่มีและไม่มีกระแสไฟฟ้า ยางสังเคราะห์จึงถูกเตรียมที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ ดังแสดงแล้วในตารางที่ 3.1 ถูกวัดความสามารถในการบวมตัว (% Swelling) เพื่อยืนยันความสำเร็จในการเชื่อมขวางและผลของสัดส่วนการเชื่อมขวางต่อการบวมตัวของยางสังเคราะห์ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเพิ่มขวางความสามารถในการบวมตัว (% Swelling) นั้นลดลง ก็คือร้อยละ 475, 433, 300, 290 และ 200 สำหรับ PDMS 1, PDMS 2, PDMS 3, PDMS 4 และ PDMS 5

ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดสอบความสามารถในการบวมตัวเราสามารถวิเคราะห์ได้ถึงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางสังเคราะห์ซึ่งแปรผันตรงกับความสามารถในการบวมตัว โดยผลของความหนาแน่นนั้นจะสามารถอธิบายได้ถึงผลของการตอบสนองทางไฟฟ้าด้วย [4-6]

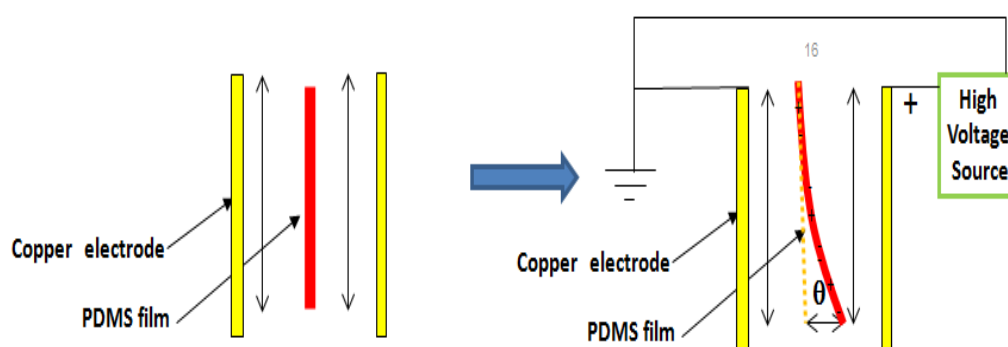
4.1.3 สมบัติการตอบสนองเชิงกลไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

4.1.3.1 การทดสอบค่ามอดูลัสสะสมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

เพื่อทดสอบผลของสัดส่วนการเชื่อมขวางต่อสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าเชิงกลของยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ยางสังเคราะห์ที่สัดส่วนการเชื่อมขวางต่างๆ ภายใต้สถานะที่มีและไม่มีภาระเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก พบว่าในระบบที่ไม่มีภาระเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้านั้น ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเชื่อมขวาง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเชื่อมขวาง ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางก็เพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับดังแสดงมาแล้วในผลของความสามารถในการบวมตัว และเมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกพบว่าค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากเมื่อมีเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกนั้น จุดเชื่อมขวางภายในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเกิดไดโพลโมเมนต์เกิดขึ้นและพยายามที่จะดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้าทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดยางพอลิไดเมทิลไซลอกเซนภายใต้สนามไฟฟ้า และพบว่าค่าการตอบสนองทางไฟฟ้า ($\Delta G' = G'_{1500} - G'_0$) นั้นก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเชื่อมขวางด้วยเช่นกัน แต่จะเริ่มลดลงที่สัดส่วนการเชื่อมขวางสูงสุด PDMS 5 ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งของวัสดุทำให้ขัดขวางการพยายามที่จะดึงดูดกันระหว่างพันธะ [4-5]

ตารางที่ 4.3 ค่ามอดูลัสสะสมของยางพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

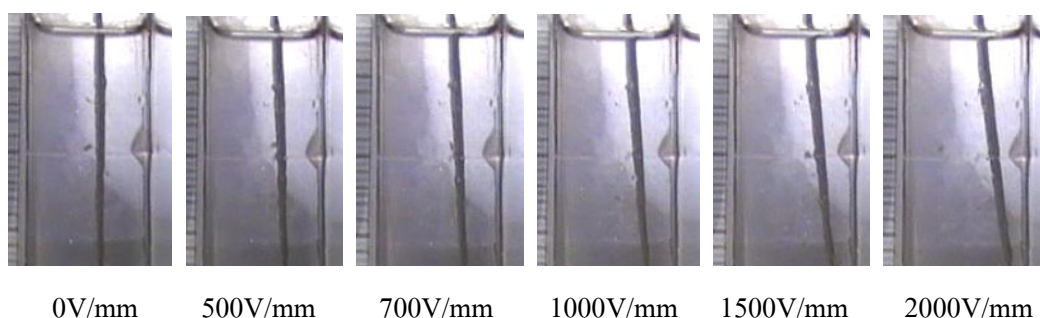
ตัวอย่าง	G'_0 (Pa)	G'_{1500} (Pa)	$\Delta G'$ (Pa)
PDMS 1	15,163	17,127	1,964
PDMS 2	16,774	19,643	2,869
PDMS 3	18,646	21,812	3,166
PDMS 4	22,844	28,378	5,534
PDMS 5	23,338	26,729	3,391



รูปที่ 4.2 ชุดเครื่องมือทดสอบวัดการบดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

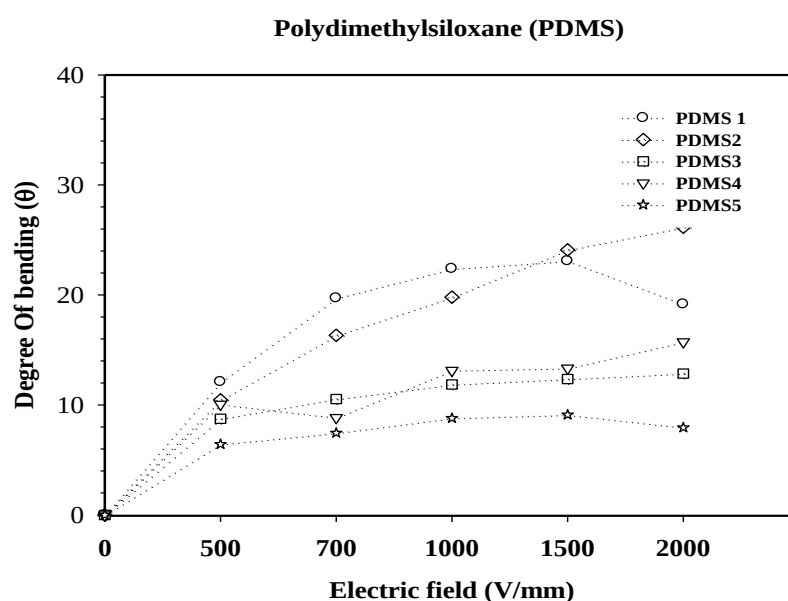
4.1.3.2 การทดสอบการบดงอของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนภายใต้สนามไฟฟ้า

เพื่อทดสอบการบดงอเมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าจากภายนอกอย่างสังเคราะห์ถูกนำมาจุ่มใส่น้ำมันซิลิโคนที่มีค่าความหนืดที่ 350 CS ซึ่งมีแผ่นอิเล็กโทรดทองแดงอยู่สองข้างห่างกัน 40 mm เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ 0-2000V/mm เกิดการตอบสนองทางไฟฟ้าคือมีการบดงอเข้าหาแผ่นอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวก และเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่ายังสังเคราะห์ที่ทดสอบนั้นมีการตอบสนองทางไฟฟ้าได้ไวมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากการทดลองจะพบว่าความเร็วในการตอบสนองทางไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 การตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ความเข้มไฟฟ้าต่างๆ

จากการทดสอบการบิดงอพบว่ายางพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มจาก 0-2000V/mm จากรูปที่ 4.3 มีการตอบสนองทางไฟฟ้าเพิ่มตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่ามีองศาการบิดงอที่มากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าซึ่งจะเห็นการบิดงอได้ชัด ในรูปที่ใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 0V/mm เทียบกับรูปที่มีการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 2000V/mm จะเห็นได้อย่างชัดเจน สาเหตุที่การบิดงอนั้นแตกต่างกันเนื่องจาก ภายในเนื้อยางสังเคราะห์นั้นมีทั้งประจุบวกและประจุลบเป็นจำนวนมาก ถ้ามีการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเข้าไปในระบบจะทำให้ชิ้นงานมีความต้องการที่จะดึงดูดเข้าหาแผ่นอิเล็กโทรด เหมือนขั้วบวกกับขั้วลบที่ต้องการดึงดูดเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองทางไฟฟ้าของยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน

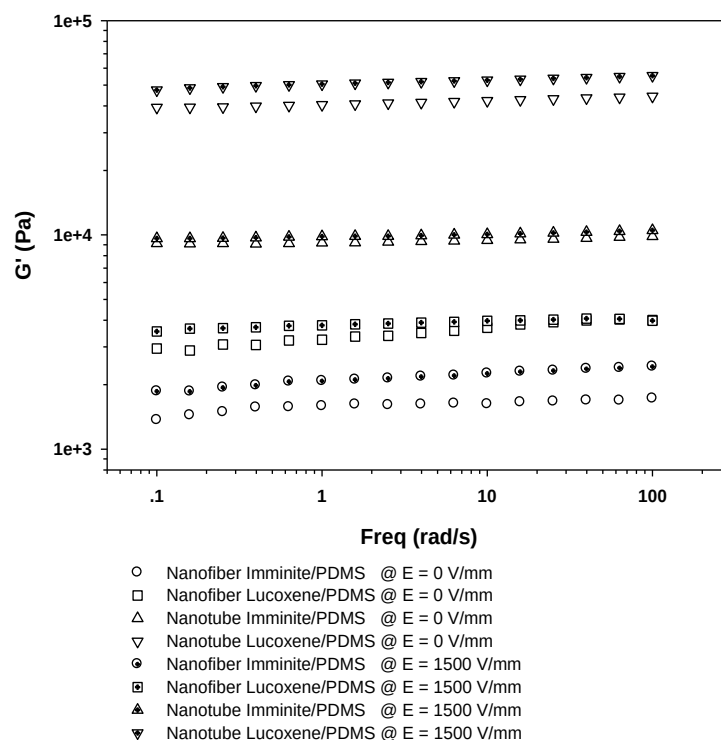
เมื่อการเชื่อมขวางของ PDMS เพิ่มขึ้นจาก PDMS1-PDMS5 เพิ่มขึ้น (0.005, 0.007, 0.01 0.03, 0.05) โมลตัวเชื่อมขวาง/โมลของมอนอเมอร์ (Nc/Nm) ตามลำดับจากกราฟที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ายางสังเคราะห์ มีผลการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ลดต่ำลงตามลำดับ เนื่องจากในโครงสร้างเกิด

การพอลาไรซ์เซชัน เกิดเป็นไดโพลโมเมนต์อนุภาคจะดึงดูดกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิด มีผลให้องศาการบิดงอนั้นลดลงด้วยเนื่องจากในโครงสร้างที่มีปริมาณสัดส่วนการเชื่อมขวางที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าลดต่ำลง

4.1.4 การตอบสนองเชิงกลไฟฟ้าของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไรซ์

4.1.4.1 การทดสอบค่ามอดูลัสสะสมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไรซ์

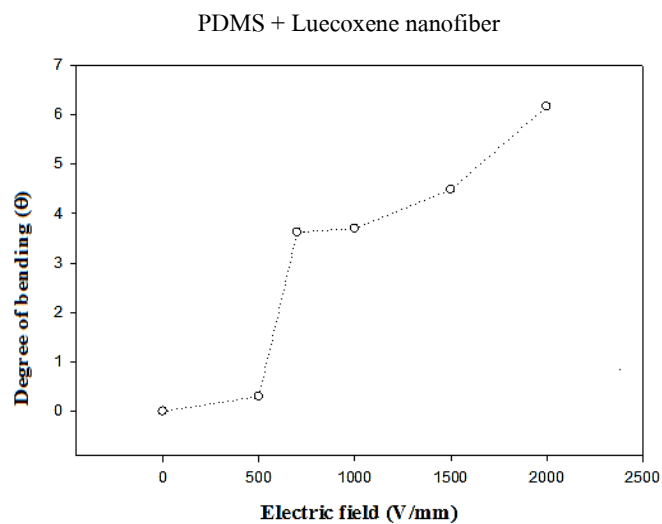
เพื่อการศึกษาผลของอนุภาคพอลาไรซ์ มอดูลัสสะสมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไรซ์ได้ เส้นใยนาโนลูโคซิน, เส้นใยนาโนอิมิไนต์ ท่อนาโนลูโคซิน และท่อนาโนอิมิไนต์ พบว่าในระบบที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกนั้น พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ผสมด้วยอนุภาค ท่อนาโนลูโคซิน, ท่อนาโนอิมิไนต์, เส้นใยนาโนลูโคซิน และ เส้นใยนาโนอิมิไนต์ มีค่ามอดูลัสสะสม ที่ 0.1 rad/s คือ 39,373.00, 9129.92, 2,947.83 และ 1366.62, 00 Pa ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคประเภทท่อนั้นเสริมแรงในยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซนได้ดีกว่าอนุภาคประเภทเส้นใย และเมื่อกระตุ้นยางผสมนี้ด้วยสนามไฟฟ้าความเข้ม 1.5 kV/mm พบว่าค่ามอดูลัสสะสมของ พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ผสมด้วยอนุภาค นั้นเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทั้งนี้เนื่องเมื่อเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในยางผสมนั้นอนุภาคพอลาไรซ์นั้นเกิดการพอลาไรซ์เซชัน เกิดเป็นไดโพลโมเมนต์และอนุภาคเหล่านี้เองจะพยายามที่จะดึงดูดกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดยางผสมเหล่านี้ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าพบว่าอนุภาคทั้งแบบชนิดท่อและเส้นแบบอิมิไนต์นั้นให้ค่าการตอบสนองคือว่าอนุภาคแบบลูโคซินทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณหลักในอนุภาคประเภทอิมิไนต์นั้นมีถึงประมาณร้อยละ 20 ในขณะที่ปริมาณหลักในอนุภาคประเภทลูโคซินนั้นมีเพียงแค่ร้อยละ 10 เท่านั้น ทำให้การตอบสนองต่อไฟฟ้าแตกต่างกัน [6]



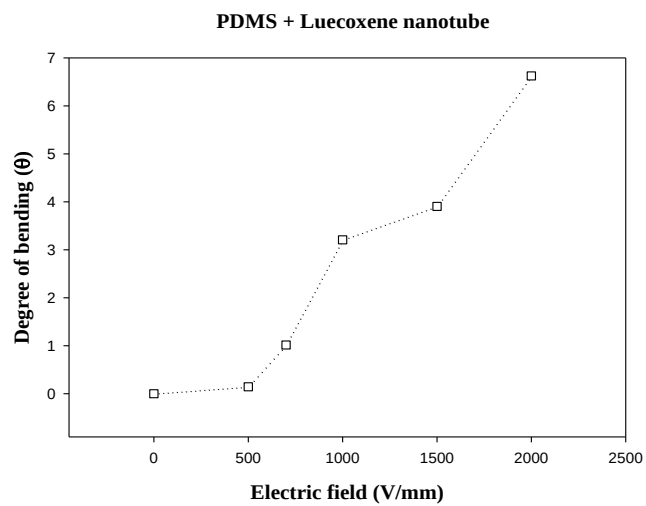
รูปที่ 4.5 ค่าสตอเรจโมดูลัส (Storage modulus) ของยางพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมภายใต้การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า 0 และ 1.5 kV

4.1.4.2 การทดสอบการบิดงอของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนภายใต้สนามไฟฟ้า

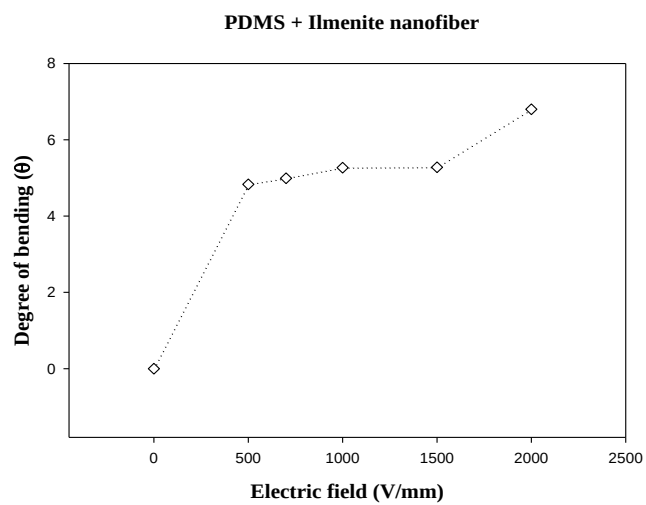
เมื่อศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าต่อองศาการบิดงอของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไลซ์พบว่าพฤติกรรมการบิดงอนั้นเหมือนการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้าของยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ไม่มีการผสมอนุภาคพอลาไลซ์ คือ เมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า องศาการบิดงอก็เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.10 ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในยางผสมนั้นอนุภาคพอลาไลซ์นั้นเกิดการพอลาไลซ์เชชัน เกิดเป็นไดโพลโมเมนต์และอนุภาคเหล่านี้เองจะพยายามที่จะดึงดูดกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเสมือนขั้วบวกกับขั้วลบที่ต้องการดึงดูดเข้าหากัน



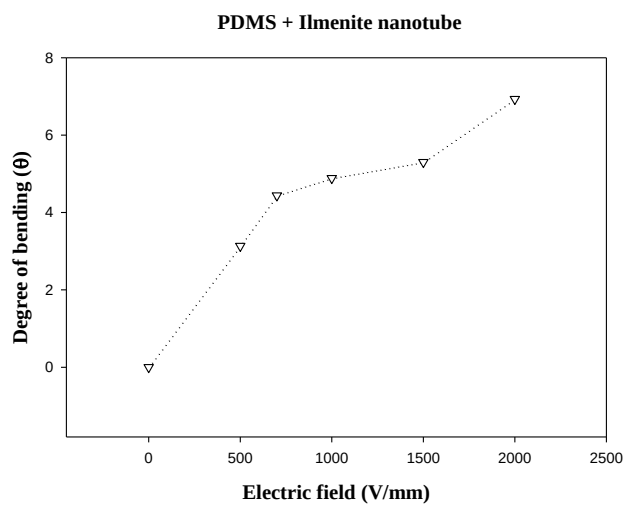
รูปที่ 4.6 แสดงองศาการบิดงอของ PDMS + Lucoxene nanofiber ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ



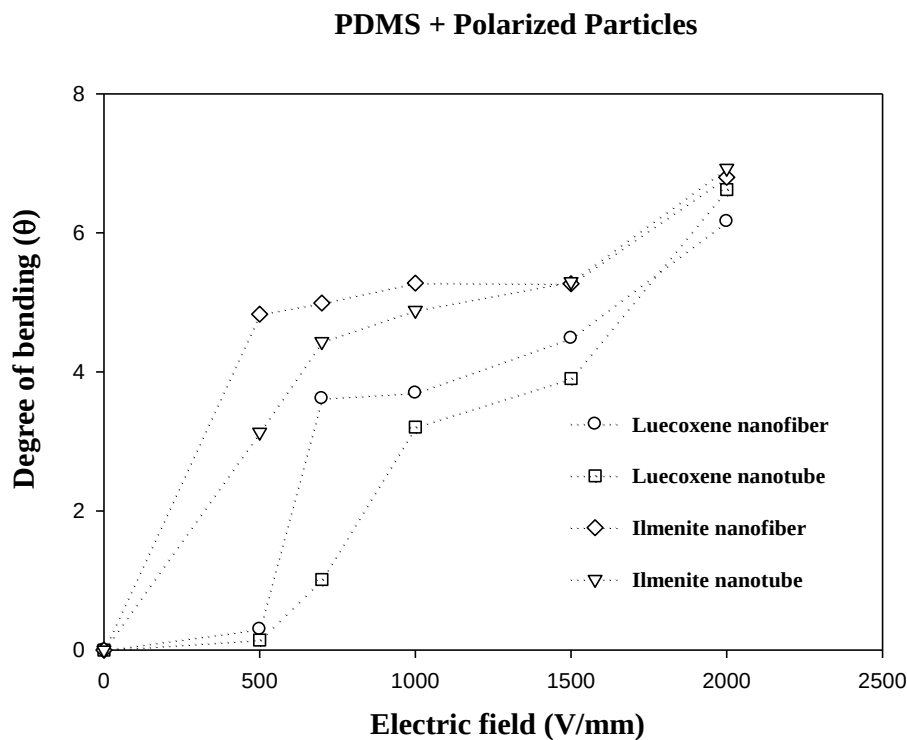
รูปที่ 4.7 แสดงองศาการบิดงอของ PDMS + Lucoxene nanotube ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.8 แสดงองศาการบิดงอของ PDMS + Lucoxene nanofiber ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงองศาการบิดงอของ PDMS + Lucoxene nanofiber ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

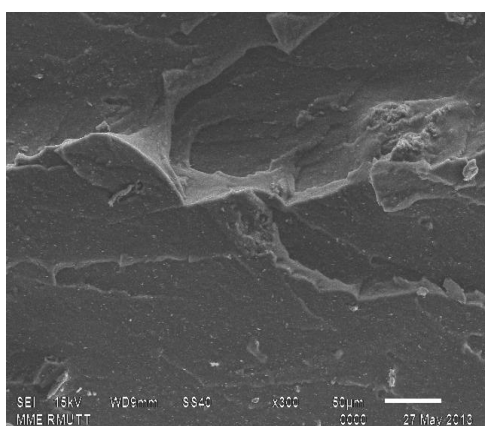


รูปที่ 4.10 พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไลซ์ชนิดต่างๆ

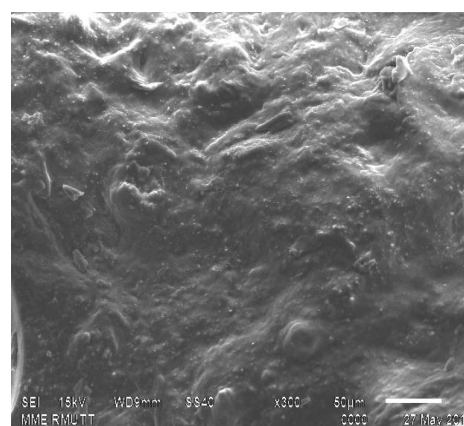
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมท่อนาโนอิมิไนต์ให้การตอบสนองทางไฟฟ้าได้มากที่สุดเนื่องจากเมื่อให้ความเข้มไฟฟ้าที่ 2000 V/mm มีค่าองศาการบิดงอมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่นๆ เช่น พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมเส้นใยนาโนลูโคซีน, พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมเส้นใยนาโนอิมิไนต์ และพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมท่อนาโนลูโคซีน แต่ค่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 2000 V/mm ของพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด นี้มีค่าองศาการบิดงอที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

4.1.5 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

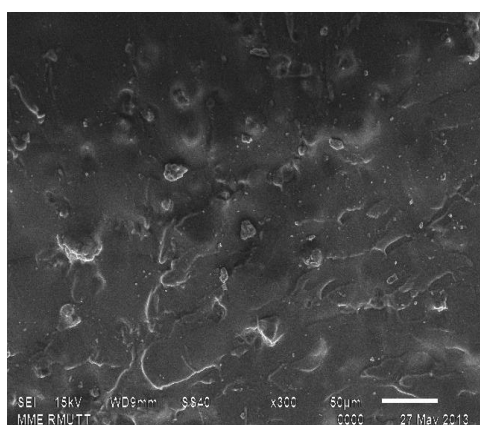
เพื่อศึกษาผลของการกระจายตัวของอนุภาคพอลาไลซ์ 2 ชนิดคือ Ilmenite และ Leucoxene ทั้งที่เป็นแบบท่อน และแบบเส้นใย ที่เติมลงไปในช่วงสังเคราะห์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน



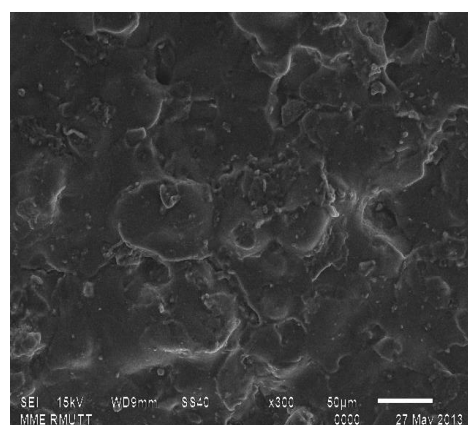
รูปที่ 4.11 Nanofiber from Ilmenite,PDMS



รูปที่ 4.12 Nanofiber from Leucoxene,PDMS



รูปที่ 4.13 Nanotubes from Ilmenite,PDMS



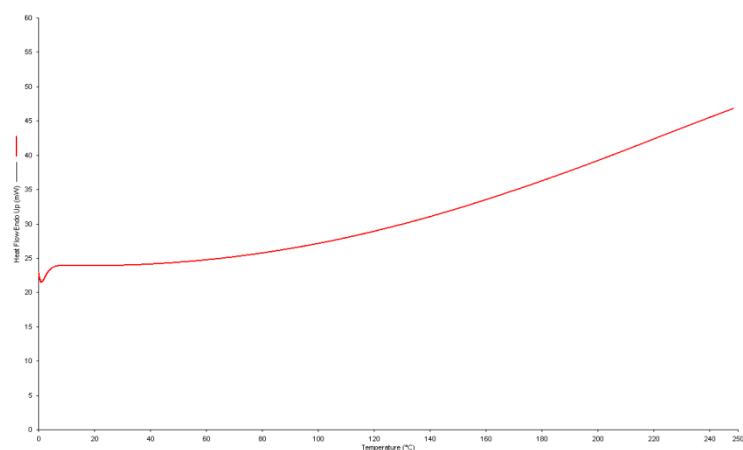
รูปที่ 4.14 Nanotubes from Leucoxene,PDMS

จากรูปที่ 4.11-4.14 อนุภาคพอลาไลซ์มีการกระจายตัวได้ดีในพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane) และการเกิดฟองอากาศของชิ้นงานนั้นมีน้อยมาก แต่ยังมีอนุภาคพอลาไลซ์

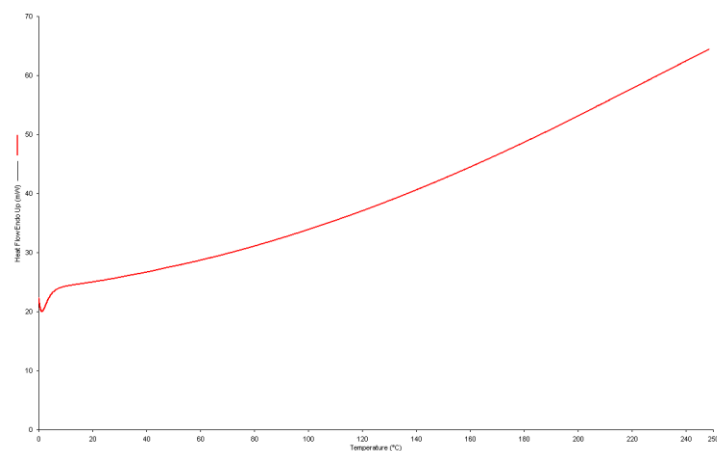
บางอนุภาคที่ยังจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคือ Nanofiber from ilmenite, Nanotubes from ilmenite แต่เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนของชิ้นงานพบว่าอัตราการเกิดฟองอากาศหรือช่องว่างภายในชิ้นงานนั้นมีน้อยมาก

4.1.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิไคเมทิลไซลอกเซนและพอลิไคเมทิลไซลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไลซ์

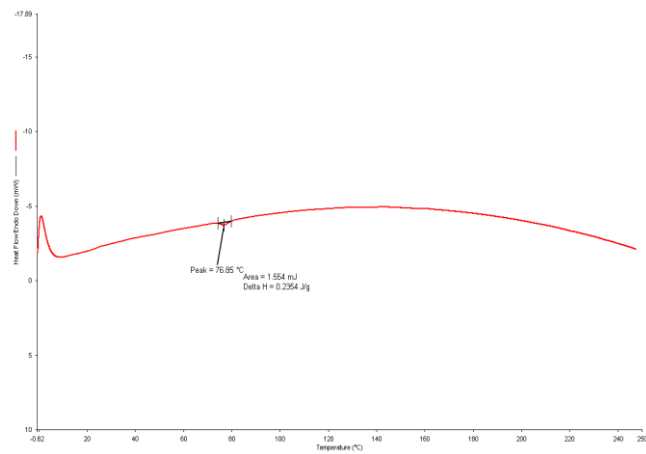
เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิไคเมทิลไซลอกเซนและพอลิไคเมทิลไซลอกเซนที่ผสมอนุภาคพอลาไลซ์ในช่วงของ T_m ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรแสดงผลกราฟและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเครื่อง DSC แสดงได้ดังนี้



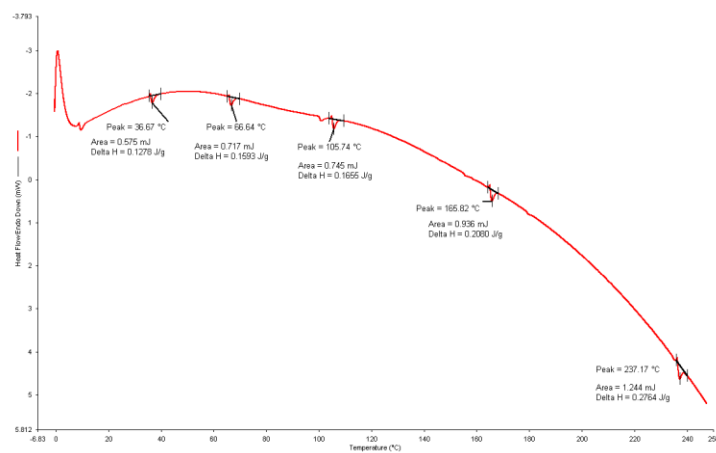
รูปที่ 4.15 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry , DSC ของ PDMS 2



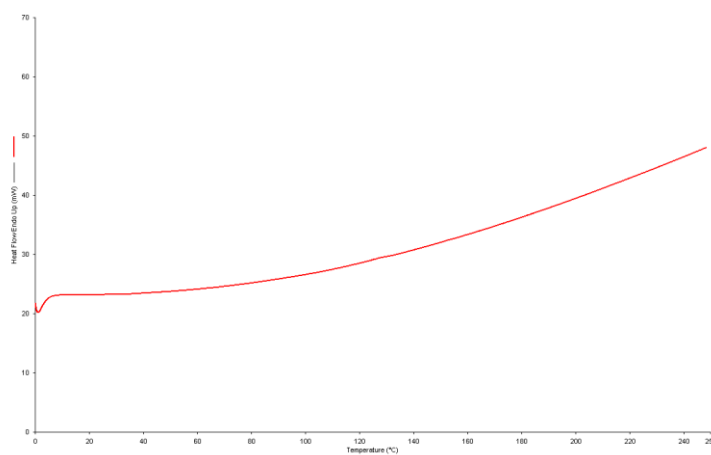
รูปที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry , DSC ของ PDMS3



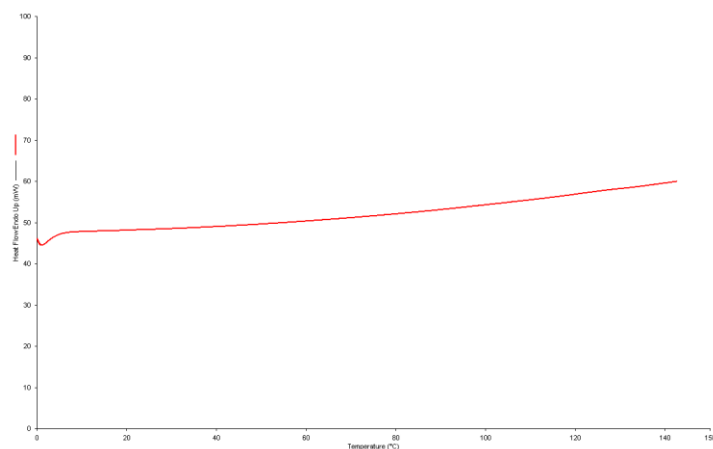
รูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry , DSC ของ PDMS+Ilmenite Nanofiber



รูปที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry , DSC ของ PDMS+Ilmenite nanotube



รูปที่ 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry, DSC ของ PDMS+Leuco fiber



รูปที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry , DSC ของ PDMS+Leuco tube

จากการทดสอบDifferential scanning calorimetry, DSC ในรูปที่ 4.15-4.20 ผลการทดสอบพบว่ายางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน(PDMS) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง Tm แต่เมื่อเติมอนุภาคพอลาไลซ์ (TiO₂) ทำให้ Tm ของยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน มีการเปลี่ยนแปลง Tm ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 76.85°C , 237.17°C ดังนั้นสรุปได้ว่าอนุภาคพอลาไลซ์ (TiO₂) ที่เติมลงไปในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีการทำปฏิกิริยากับยางสังเคราะห์

4.1.7 ผลการคำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis, F_d)

เพื่อคำนวณแรง (Dielectrophoresis, F_d) ขึ้นงานถูกวัดการตอบสนองการบิดงอและวัดค่ามอดูลัสสะสมภายใต้การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า แล้วนำผลการทดสอบมาคำนวณแรง(Dielectrophoresis, F_d) ด้วยสมการที่ (4.1-4.3)

$$V(y = 0, x = 0) = \frac{Fdl^3}{3EI} = d \quad (4.1)$$

$$F_D = mg \sin \theta + F_d \quad (4.2)$$

$$F_d = \frac{d(3EI)}{l^3} \quad (4.3)$$

เมื่อ V = คือระยะทางของการบิดงอสุดท้าย

E = ค่ายังมอดูลัส มีค่าเท่ากับ $2G(1+\nu)$

G คือ ค่ามอดูลัสเฉือน ($\omega = 1 \text{ rad/s}$) $\approx 12,00$ และ $22,000 \text{ Pa}$

สำหรับอัตราการเชื่อม ขวาง ที่ 0.001 และ 0.01 ตามลำดับ

θ อัตราส่วนบัวของค (0.5 สำหรับ incompressible sample)

I = คือค่าโมเมนต์ของอินีเซีย $\frac{1}{12} + t^3w$

t = ค่าความหนาของฟิล์ม PDMS

w = ค่าความกว้างของฟิล์ม PDMS

l = ค่าความยาวของฟิล์ม PDMS

ดังแสดงค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis, F_d)

Sample	E (V/mm)	θ	$m \sin \theta$	$t^3 (m^3)$	$t^3/12 (m^3)$	w(m)	$I = (t^3/12) * w$	$(m)I^3$	d (m)	F_d	F_D
		(degree)	($\times 10^{-4}$)	($\times 10^{-8}$)	($\times 10^{-9}$)		(m) ($\times 10^{-13}$)	($\times 10^{-6}$)		($\times 10^{-5}$) N	($\times 10^{-4}$) N
Luecoxene nonafiber	0	0.000	0	1.295	1.079	0.007	7.950	3.990	0.000	0.000	0
Mass = m = 0.42g	500	0.298	1.211	1.295	1.079	0.007	7.950	3.990	0.021	0.008	0.320
Thickness = t = 0.00109 m	700	3.619	-1.894	1.295	1.079	0.007	7.950	3.990	0.233	0.092	1.220
Width = w = 0.00737m	1,000	3.697	-2.173	1.295	1.079	0.007	7.950	3.997	0.236	0.093	1.802
Initial length = I0	1,500	4.485	-4.014	1.295	1.079	0.007	7.950	3.997	0.253	0.099	2.080
	2,000	6.166	-0.482	1.295	1.079	0.007	7.950	3.997	0.411	0.162	3.914
Luecoxene nonatube	0	0.000	0.000	1.213	1.011	0.010	9.780	9.051	0.000	0.000	0.000
Mass = m = 0.51g	500	0.144	0.001	1.213	1.011	0.010	9.780	9.051	0.011	0.002	0.003
Thickness = t = 0.00107m	700	3.904	-34.567	1.213	1.011	0.010	9.780	9.051	0.256	0.012	3.270
Width = w = 0.009673m	1,000	1.016	42.521	1.213	1.011	0.010	9.780	9.051	0.056	0.046	16.810
Initial length = I0	1,500	3.208	-3.316	1.213	1.011	0.010	9.780	9.051	0.213	0.055	34.512
	2,000	6.624	16.725	1.213	1.011	0.010	9.780	9.052	0.400	0.086	42.533
Ilmenite nanofiber	0	0.000	0.000	2.904	2.419	0.010	2.477	10.737	0.000	0.000	0.000
Mass = m = 0.69g	500	4.830	-40.915	2.903	2.419	0.010	2.477	10.737	0.330	0.147	20.492
Thickness = t = 0.00143m	700	4.992	-39.601	2.903	2.419	0.010	2.477	10.737	0.322	0.151	34.596
Width = w = 0.01024m	1,000	5.279	-34.771	2.903	2.419	0.010	2.477	10.737	0.382	0.157	34.821
Initial length = I0	1,500	5.269	-34.986	2.903	2.419	0.010	2.477	10.737	0.360	0.164	39.454
	2,000	6.799	20.334	2.903	2.419	0.010	2.477	10.737	0.344	0.175	40.765
Ilmenite nanotube	0	0.000	0.000	1.331	1.109	0.008	9.243	5.787	0.000	0.000	0.000
Mass = m = 0.42g	500	3.134	0.548	1.331	1.109	0.008	9.243	5.787	0.163	0.052	0.599
Thickness = t = 0.00110m	700	4.436	-65.129	1.331	1.109	0.008	9.243	5.787	0.200	0.063	40.867
Width = w = 0.00833m	1,000	4.885	-66.681	1.331	1.109	0.008	9.243	5.787	0.286	0.081	56.308
Initial length = I0	1,500	5.299	-56.389	1.331	1.109	0.008	9.243	5.787	0.256	0.090	65.066
wight 0.69 g	2,000	6.929	40.741	1.331	1.109	0.008	0.000	5.787	0.398	0.126	66.590

โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันแก่ยางผสมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับอนุภาคโพลาลิธ จะเกิดการโพลาลิธของอนุภาคโพลาลิธ เรียกว่า ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ซึ่งไดโพลโมเมนต์นี้ ก่อให้เกิดแรงดึงดูดหรือผลักอนุภาคให้เคลื่อนที่ เรียกว่าแรง ไดอิเล็กโตรโฟรีติก (dielectrophoretic force) จากตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่า ไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดหรือแรงผลักของอนุภาคโพลาลิธภายในเมทริกซ์ และยางผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับท่อนาโนคาร์บอนทำให้ค่าแรงไดอิเล็กโตรโฟรีติกสูงมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการพัฒนาชนิดอนุภาคพอลาไลซ์ และความเข้มข้นไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงกลไฟฟ้าของยางคอมโพสิต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์ (เส้นใยนาโนลูโคซิน, เส้นใยนาโนอิมิไนต์ ท่อนาโนลูโคซิน และท่อนาโนอิมิไนต์) เพื่อเป็นกล้ำเนื้อเทียมที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า ได้มีการดำเนินการจัดทำโครงการได้สำเร็จลุล่วง โดยผลของการจัดทำโครงการนั้นทำให้ได้ข้อสรุปต่างๆ ดังนี้

สรุป

การขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์สำเร็จและตรวจสอบความสำเร็จของการขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์ ด้วยเทคนิค Swelling, Differential scanning calorimetry , DSC และภาพถ่ายสัณฐานวิทยาจากเครื่อง Scanning Eletron Microscopy (SEM)

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของระบบยางสังเคราะห์ต่อการตอบสนองการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกนั้นถูกศึกษาในช่วง Linear viscoelastic ที่ความเครียด 1% ช่วงความถี่ 0.1-100 rad/s จากการทดสอบค่าสตอเรจ มอดูลัส (Storage modulus) ของยางสังเคราะห์ที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ พบว่าค่าสตอเรจมอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเชื่อมโยงของยางสังเคราะห์ และเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกค่าสตอเรจมอดูลัส (Storage modulus) สูงขึ้นทำให้ด้วยการบิดงอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากระบบจะเกิดพอลาไลซ์ที่จุดเชื่อมขวางของสายโซ่ทำให้เกิดพันธะทางกายภาพเกิดขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดโครงสร้าง ค่าสตอเรจ มอดูลัส (Storage modulus) จึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก และจากการวิจัยพบว่า พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่สัดส่วนการเชื่อมขวาง 0.03 ตอบสนองทางไฟฟ้ามากที่สุด

เมื่อมีการผสมอนุภาคพอลาไลซ์ (TiO_2) เข้ากับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนพบว่าอนุภาคพอลาไลซ์ประเภท อิมิไนต์แบบท่อ ตอบสนองทางไฟฟ้าได้ดีที่สุดคือ 804.02 rad/s เมื่อเทียบกับอนุภาค

พอลาไลซ์แบบ เส้นใยนาโนลูโคซีน, เส้นใยนาโนอิมิไนต์ และท่อนาโนลูโคซีน อยู่ที่ (597.07 , 493.26 , 488.65 rad/s) ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยที่คาดว่าจะต้องทำต่อไปคือ การผสมอนุภาคพอลาไลซ์ (TiO_2) ชนิดอื่นๆที่มีราคาถูก และมีค่าการนำไฟฟ้าสูง เพื่อพัฒนาและหาอนุภาคโพลาลิซ์ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นแอคทูเอเตอร์ต่อไป