

การตอบสนองเชิงกลไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตอนุภาคพอลาไลซ์/พอลิไดเมทิลไซ ลอกเซนสำหรับการประยุกต์ใช้ในแอกทูเอเตอร์

The eletromechanical reasponse of polarized particles/polydimethyisiloxane composite for actuator application

สมนมาลย์ เนียมกลาง^{1*}, สรพงษ์ ภาวสุปรี¹, วิเชียร ขาวดา¹, จตุรนต์ กิตติศักดิ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ปทุมธานี

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

Sumonman Niamlang^{1*}, Sorapong Pavasupree¹, Wichan Khawdas¹ and Jaturon Kittisak¹,

Department of Material and Metallurgical Engineering, Faculty of engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, ThanyaburiPathumthani 12110

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

บทคัดย่อ

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

คำหลัก อนุภาคพอลาไลซ์, สมบัติเชิงกลไฟฟ้า, พอลิไดเมทิลไซลอกเซน

Abstract

To study the effect of polarized particle and electric field strength on the eletroctromechanical properties of elastomer composite, polydimethylsiloxane/polarized particles (Leucosene Nanofibers, Leucosene Nanotubes, Ilmenite Nanofibers and Ilmenite Nanotubes) composite, were prepared at various crosslinking ration and amount of polarized particle. The dielectric constant and electrical response were

studied under an applied external electric field (0-1.5 kV). A parallel plate melt rheometer was used to measure the storage modulus and the loss modulus of polydimethylsiloxane/polarized particle composite. All experiments were conducted in the linear viscoelastic regime, in the frequency range of 0.1 -100 rad/s and at 1% strain. When the external electric field applied, the storage modulus increased because of the electric force between the polarized particles. As increasing the electrical conductivity of polarized particles, thus higher shear force is required. The power consumptions of polydimethylsiloxane composite material consume power in mA scale. Thus, polydimethylsiloxane composite reported here may represent a candidate for new electroresponsive material with good mechanical properties for artificial muscle applications.

Keyword: polarized particle, eletromechanical response, polydimethylsiloxane

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุที่สามารถตอบสนองการเติบโตของอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์ (Actuator) ในอุตสาหกรรมจักรกลต่างๆ นั้นยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมได้ ทั้งในเรื่องของราคา สมบัติการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก กระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการพัฒนาวัสดุที่ง่ายต่อการขึ้นรูป มีต้นทุนการผลิตต่ำ และความสามารถและความไวต่อการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอกนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ตอบสนองไฟฟ้า (Electroactive Polymer, EAPs) นั้นเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่นำไปใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์ มีสมบัติด้านความยืดหยุ่น ทำให้สามารถขึ้นรูปให้ได้โครงสร้างซับซ้อน และน้ำหนักเบาเป็นทางเลือกใหม่ได้ โดยกลไกการทำงานและการควบคุมวัสดุพอลิเมอร์เพื่อเป็นอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์นั้นแตกต่างจากวัสดุพวกโลหะและโลหะผสมโดยสิ้นเชิง เนื่องจากโลหะและโลหะผสมนั้น มีคุณสมบัติเป็นของแข็งและการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ขาดความยืดหยุ่น และยากต่อการเคลื่อนที่ระยะแคบหรือการเคลื่อนที่แบบโค้ง แต่วัสดุพอลิเมอร์นั้นมีคุณสมบัติเป็นแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ซึ่งทำให้มีความยืดหยุ่นสูงทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการเคลื่อนที่แบบโค้งได้ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบอย่างสังเคราะห์ผสมเพื่อประยุกต์ใช้เป็นแอคทูเอเตอร์ที่สามารถควบคุมได้ด้วยไฟฟ้า โดยนำยางสังเคราะห์มาผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์ได้ เมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก ยางสังเคราะห์ผสมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของยางผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วย

สนามไฟฟ้าภายนอก จากสมบัติเหล่านี้เองจึงมีการประยุกต์ใช้แอคทูเอเตอร์ที่ทำมาจาก EAPs ในงาน Bionics, Mechatronics, Microrobotics, Microfluidics ซึ่งข้อดีของ EAPs สำหรับใช้เป็นแอคทูเอเตอร์นั้น คือเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียวสามารถขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ ได้ และราคาไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ [1-3]

พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติตอบสนองทางไฟฟ้ามีหลายประเภท เช่น อีลาสโตเมอร์ (ยางธรรมชาติ หรือ ยางสังเคราะห์) พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Polyacetylene, Polythiophene, Poly(p-phenylenevinylene) ซึ่งในการวิจัยนี้ยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (Polydimethylsiloxane) ถูกเลือกเป็นพอลิเมอร์ตอบสนองทางไฟฟ้าต้นแบบ นำมาผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์อื่นๆ เช่น สารพวกโลหะออกไซด์ ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ในประเทศไทย ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและแหล่งกำเนิดต่างๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อไฟฟ้าดีที่สุด ขึ้นรูปง่าย และราคาถูกเป็นวัสดุตอบสนองต่อไฟฟ้าในงานแอคทูเอเตอร์

2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.1 การขึ้นรูปพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (PDMS)

ทำการขึ้นรูปพอลิไดเมทิลซิลลอกเซนด้วยการนำพอลิไดเมทิลซิลลอกเซนจำนวน 3.68 กรัม ผสมกับ Tetraethyl orthosilicate (TED) และ Dibutyltin dilaurate (Tin) จำนวน 0.04 กรัม เพื่อเป็นตัวเชื่อมโยง (Cross-linker) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ตามลำดับ จากนั้นนำสารที่เตรียมได้เทลงไปในแบบ เส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร หน้า 1 มิลลิเมตร เพื่อขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสม แล้วจึงทิ้งไว้ 1-2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องโดยปริมาณของสารต่างๆที่ใช้เตรียมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ

ตัวอย่าง	PDMS (g)	TED (g)	(N_c/N_m)
PDMS 1	3.68	0.041	0.005
PDMS 2	3.68	0.058	0.007
PDMS 3	3.68	0.083	0.010
PDMS 4	3.68	0.244	0.030
PDMS 5	3.68	0.416	0.050

* N_c/N_m = จำนวนโมลสารเชื่อมขวาง/จำนวนโมลมอนอเมอร์

2.2 การขึ้นรูปยางผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและอนุภาคพอลาไลซ์

การขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไลซ์ได้เพื่อทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของสังเคราะห์ผสมที่สัดส่วนการเชื่อมโยง (N_c/N_m) เท่ากับ 0.01 มาผสมขึ้นรูปกับกับอนุภาคพอลาไลซ์ที่มีความสามารถในการพอลาไลซ์ต่างกัน คือ เส้นใยนาโนลูโคซิน, เส้นใยนาโนอีพ็อกซี, ท่อนาโนลูโคซิน และท่อนาโนอีพ็อกซี โดยนำอนุภาคที่พอลาไลซ์ได้มาผสมในสัดส่วน 10%โดยน้ำหนัก

2.3 การทดสอบการบวมตัว (Swelling test)

การหาอัตราการบวมตัว (Degree of swelling) เป็นการวัดความสามารถในการบวมตัวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่สังเคราะห์ขึ้นในสารละลายโทลูอีนเป็นเวลา 5 วันแล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหา ส่วนการหาค่าอัตราการบวมตัว (Degree of swelling) ที่เวลาต่างๆ ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Degree of swelling (\%)} = \frac{M - M_d}{M_d} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ M = น้ำหนักของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่บวมโทลูอีน

M_d = น้ำหนักของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่แห้ง

M_i = น้ำหนักของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนก่อนนำไปแช่โทลูอีน

2.4 สมบัติการตอบสนองไฟฟ้าเชิงกล

การวัดสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของยางผสมเมื่อมีการกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าภายนอกถูกวัดที่อุณหภูมิ 27 °C โดยเครื่อง Parallel Plate Melt Rheometer (rheometric scientific Inc,ARES) ชิ้นงานถูกเตรียมมีขนาดความหนาประมาณ 1 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. โมดูลัสสะสม (Storage modulus) และโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) ถูกวัดที่หลายความถี่แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่อง Parallel Plate Melt Rheometer

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 การบวมตัวของของยางสังเคราะห์

เพื่อวิเคราะห์ผลของอัตราการเชื่อมโยงต่อคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติในระบบที่มีและไม่มี การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า ยางสังเคราะห์จึงถูกเตรียมที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ ดังแสดงแล้วในตารางที่ 1 ถูกวัดความสามารถในการบวมตัว (% Swelling) เพื่อยืนยันความสำเร็จในการเชื่อมขวางและผลของสัดส่วนการเชื่อมขวางต่อการบวมตัวของยางสังเคราะห์ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเพิ่มขวางนั้น สามารถในการบวมตัว (% Swelling) นั้นลดลง คือจากร้อยละ 475, 433, 300, 290 และ 200 สำหรับ PDMS 1, PDMS 2, PDMS 3, PDMS 4 และ PDMS 5 ตามลำดับ ดังนั้นจากการทดสอบความสามารถในการบวมตัวเราสามารถวิเคราะห์ได้ถึง ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางสังเคราะห์ซึ่งแปรผันตรงกับความความสามารถในการบวมตัว โดยผลของความหนาแน่นนั้นจะสามารถอธิบายได้ถึงผลของการตอบสนองทางไฟฟ้าด้วย

3.2 สมบัติการตอบสนองไฟฟ้าเชิงกลของพอลิไธเมทิลซิลลอกเซน

เพื่อทดสอบผลของสัดส่วนการเชื่อมขวางต่อสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าเชิงกลของยางสังเคราะห์พอลิไธเมทิลซิลลอกเซน ยางสังเคราะห์ที่สัดส่วนการเชื่อมขวางต่างๆ ภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีภาระเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก พบว่าในระบบที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเชื่อมขวาง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเชื่อมขวาง ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางก็เพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับดังแสดงมาแล้วในผลของความสามารถในการบวมตัว และเมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกพบว่าค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากเมื่อมีเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกนั้นจุดเชื่อมขวางภายในพอลิไธเมทิลซิลลอกเซนเกิดไดโพลโมเมนต์เกิดขึ้นและพยายามที่จะดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้าทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดยางพอลิไธเมทิลซิลลอกเซนภายใต้สนามไฟฟ้า และพบว่าค่าการตอบสนองทางไฟฟ้า ($\Delta G' = G'_{1500} - G'_0$) นั้นก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเชื่อมขวางด้วยเช่นกัน แต่จะเริ่มลดลงที่สัดส่วนการเชื่อมขวางสูงสุด PDMS 5 ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุทำให้ขีดขวางการพยายามที่จะดึงดูดกันระหว่างพันธะ [4-5]

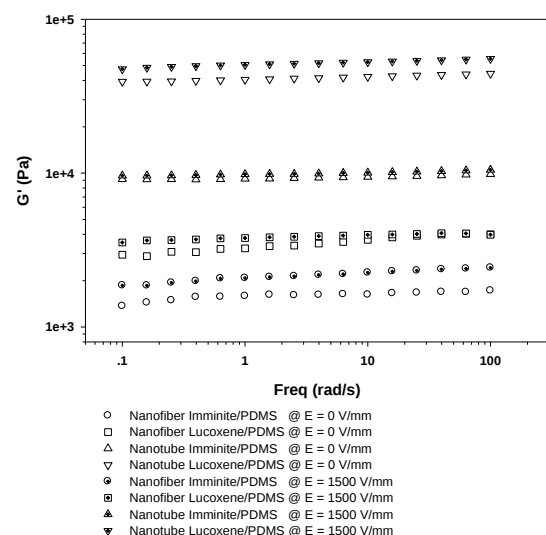
ตารางที่ 2 ค่ามอดูลัสสะสมของยางพอลิไธเมทิลซิลลอกเซน

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

3.2 สมบัติการตอบสนองไฟฟ้าเชิงกลของพอลิไธเมทิลซิลลอกเซนผสมอนุภาคพอลาไลซ์

เพื่อทำการศึกษาผลของอนุภาคพอลาไลซ์ มอดูลัสสะสมของพอลิไธเมทิลซิลลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไลซ์ได้ เส้นใยนาโนลูโคซีน, เส้นใยนาโนอิมิไนต์ ท่อนาโนลูโคซีน และท่อนาโนอิมิไนต์ พบว่าในระบบที่ไม่มีการ

เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกนั้น พอลิไธเมทิลซิลลอกเซนที่ผสมด้วยอนุภาค ท่อนาโนลูโคซีน, ท่อนาโนอิมิไนต์, เส้นใยนาโนลูโคซีน และ เส้นใยนาโนอิมิไนต์ มีค่ามอดูลัสสะสม ที่ 0.1 rad/s คือ 39,373.00, 9129.92, 2,947.83 และ 1366.62, 00 Pa ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคประเภทท่อนั้นเสริมแรงในยางสังเคราะห์พอลิไธเมทิลซิลลอกเซนได้ดีกว่าอนุภาคประเภทเส้นใย และเมื่อกระตุ้นยางผสมนี้ด้วยสนามไฟฟ้าความเข้ม 1.5 kV/mm พบว่าค่ามอดูลัสสะสมของ พอลิไธเมทิลซิลลอกเซนที่ผสมด้วยอนุภาค นั้นเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้เนื่องเมื่อเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในยางผสมนั้นอนุภาคพอลาไลซ์นั้นเกิดการพอลาไลซ์เซชัน เกิดเป็นไดโพลโมเมนต์และอนุภาคเหล่านั้นเองจะพยายามที่จะดึงดูดกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดยางผสมเหล่านั้น แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าพบว่าอนุภาคทั้งแบบชนิดท่อและเส้นแบบอิมิไนต์นั้นให้ค่าการตอบสนองดีกว่าอนุภาคแบบลูโคซีน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณหลักในอนุภาคประเภทอิมิไนต์นั้นมีถึงประมาณร้อยละ 20 ในขณะที่ปริมาณหลักในอนุภาคประเภทลูโคซีนนั้นมีเพียงแค่อ้อยู่ 10 เท่านั้น ทำให้การตอบสนองต่อไฟฟ้าแตกต่างกัน [6]



รูปที่ 2 ค่าสโตเรจมอดูลัส (Storage modulus) ของยางพอลิไธเมทิลซิลลอกเซนผสมภายใต้การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า 0 และ 1.5 kV

4. สรุปผลการทดลอง

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของระบบยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซนต่อการตอบสนองการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกนั้นถูกศึกษาในช่วง Linear viscoelastic ที่ความเครียด 1% ช่วงความถี่ 0.1-100 rad/s จากการทดสอบค่ามอดูลัสของยางพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ พบว่าค่าสตอเรจมอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเชื่อมโยงของยาง และเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกค่ามอดูลัสจะสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากระบบจะเกิดพอลาไรซ์ที่จุดเชื่อมโยงของสายโซ่ทำให้เกิดพันธะทางกายภาพเกิดขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดโครงสร้างค่าสตอเรจ มอดูลัส จึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกและเมื่อศึกษาเพื่อทำการศึกษาผลของอนุภาคพอลาไรซ์ มอดูลัสของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมกับอนุภาคพอลาไรซ์ได้ เส้นใยนาโนลูโคซีน, เส้นใยนาโนอีไมด์ ท่อนาโนลูโคซีน และท่อนาโนอีไมด์พบว่า ระบบยางพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เติมอนุภาคนิดอีไมด์ทั้งรูปแบบท่อและเส้นใยนั้นให้ผลการตอบสนองดีกว่าระบบที่ผสมกับอนุภาคนิดลูโคซีนทั้งนี้เนื่องจากปริมาณหลักอนุภาคเหล่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติในการสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณกลุ่มวิจัย Advance Material Research คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard J. Spontak. (2007). Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators
- [2] Bar-Cohen Y., Xue T., Shahinpoor M., Simpson J. O., and Smith J. 1998 Low-mass muscle actuators using electroactive polymers (EAP) Proceedings of SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Paper No. 3324-32

- [3] Debashish R., Jennifer N. C. and Brent S. S., 2010. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. Progress in Polymer Science:35. pp. 278-321.
- [4] Niamlang S., Sirivat A., 2008 Dielectrophoresis force and deflection of electroactive poly(phenylene vinylene)/polydimethylsiloxane Blends Smart Materials and Structures:17 pp. 035036
- [5] Niamlang S., Sirivat A., 2008 Electromechanical responses of a crosslinked polydimethylsiloxane", Macromolecular Symposia, 264, 176-183.
- [6] Shiga, T. 1997. Deformation and viscoelastic behavior of polymer. gels in electric fields. Adv.Polym. Sci.: 134 pp.133-163.