

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมจักรกลนั้นยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของระบบแขนจักรกลซึ่งมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการพัฒนาวัสดุเพื่อรองรับระบบแขนจักรกลที่ง่ายต่อการควบคุม และมีความแม่นยำสูงจึงมีความจำเป็นมาก โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้เป็นแขนจักรกลนั้นเป็นวัสดุจำพวกโลหะและโลหะผสม แต่เนื่องจากโลหะหรือโลหะผสมเหล่านี้มีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนัก และคุณสมบัติด้านการยืดหยุ่น และการออกแบบให้ได้โครงสร้างที่ซับซ้อน ทำให้วัสดุพอลิเมอร์ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น การขึ้นรูปให้ได้โครงสร้างซับซ้อน และน้ำหนักเบาเป็นทางเลือกใหม่สำหรับเป็นวัสดุสำหรับผลิตแขนจักรกล โดยกลไกการทำงานและการควบคุมวัสดุพอลิเมอร์เพื่อเป็นแขนจักรกลนั้นแตกต่างจากวัสดุพวกโลหะและโลหะผสมโดยสิ้นเชิง เนื่องจากโลหะและโลหะผสมนั้นผสมมีคุณสมบัติเป็นของแข็งและการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ขาดความยืดหยุ่น และยากต่อการเคลื่อนที่ระยะแคบหรือการเคลื่อนที่แบบโค้ง แต่วัสดุพอลิเมอร์นั้นมีคุณสมบัติเป็นแบบวิสโคอีลาสติก(viscoelastic) ซึ่งทำให้มีความยืดหยุ่นสูงทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการเคลื่อนที่แบบโค้งได้ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบยางผสมเพื่อประยุกต์ใช้เป็นแขนจักรกลอุตสาหกรรมที่สามารถควบคุมได้ด้วยไฟฟ้า โดยนำยางสังเคราะห์เพื่อพัฒนาระบบแขนจักรกลอุตสาหกรรมระบบยางผสมนี้ถูกผสมจากยางสังเคราะห์และอนุภาคโพลาลิไซค์ได้ จากคุณสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของยางผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเปรียบเสมือนการบังคับการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อมนุษย์ จึงสามารถนำไปพัฒนาเป็นแขนกลอุตสาหกรรมได้

วัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า(Electroactive material) เป็นวัสดุที่ตอบสนองหรือ/และปรับคุณสมบัติได้เมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก พอลิเมอร์ที่ตอบสนองทางไฟฟ้า(Electroactive polymer, EAPs) เป็นอีกวัสดุตอบสนองไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งที่ถูกนำไปใช้ในงานเซนเซอร์ (sensor) และทรานสดิวเซอร์(Transducers) เซนเซอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด (monitoring) การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความร้อน การนำไฟฟ้า หรือ สี เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมหรือคุณสมบัติ ในขณะที่ทรานสดิวเซอร์นั้นเป็นการแปลงแปลงพลังงานจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง โดยทั่วไป EAPs จะถูกนำไปใช้เป็นแอคทูเอเตอร์(Actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก

โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกนั้นสมบัติเชิงกล เช่น ความเครียด ความเค้น จะเปลี่ยนไป จากคุณสมบัติเหล่านี้เองจึงมีการประยุกต์ ใช้แอคทูเอเตอร์ที่ทำมาจาก EAPs ในงาน Bionics, Mechatronics, Microrobotics, Microfluidics ซึ่งข้อดีของ EAPs สำหรับใช้เป็นแอคทูเอเตอร์นั้น คือเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มียืดหยุ่นสูง มีความเหนียว สามารถขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆได้ และราคาไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์อื่นๆ[1]

พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติตอบสนองทางไฟฟ้ามีหลายประเภท เช่น อิลาสโตเมอร์ (ยางธรรมชาติ หรือ ยางสังเคราะห์) พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Polyacetylene, Polythiophene, Poly(p-phenylenevinylene) ซึ่งในการวิจัยยางสังเคราะห์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane) ถูกเลือกเป็นพอลิเมอร์ตอบสนองทางไฟฟ้าต้นแบบ เพื่อนำมาศึกษาการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก แต่เนื่องจากยางสังเคราะห์โดยมากมีการตอบสนองทางไฟฟ้าช้า และน้อยเมื่อเทียบกับสารพอลาไลซ์อื่นๆ เช่น สารพวกโลหะออกไซด์ จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาการตอบสนองต่อไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและโลหะออกไซด์ต่างๆ ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ในประเทศไทย ได้แก่ ไททานเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและแหล่งกำเนิดต่างๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อไฟฟ้าดีที่สุด ขึ้นรูปง่าย และราคาถูกเป็นวัสดุตอบสนองต่อไฟฟ้าในงานแอคทูเอเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไดเมทิลและอนุภาคพอลาไลซ์ได้ (polarized particles) ที่ขนาดและโครงสร้างผลึกต่างๆ สำหรับใช้เป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อโมดูลัสและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและอนุภาคพอลาไลซ์ได้ (polarized particles) ที่ขนาดและโครงสร้างผลึกต่างๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและอนุภาคพอลาไลซ์ได้ (polarized particles) ต่างๆ
2. ผลของปริมาณของอนุภาคพอลาไลซ์ได้ (polarized particles) ต่อสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้า เช่น สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและอนุภาคพอลาไลซ์ได้ (polarized particles) ที่ขนาด เพื่อใช้เป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า
2. คุณสมบัติที่ตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ผสมที่อนุภาคพอลาไลซ์ได้ (polarized particles) ต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุตอบสนองต่อไฟฟ้า (Electroactive material)

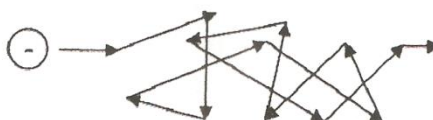
เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการตอบสนองทางไฟฟ้า มีบทบาทในงานวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างกว้างขวางโดยมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ไม่ว่าจะเป็นความเค้น หรือความเครียด ตัวอย่างวัสดุตอบสนองต่อไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์(electroceramic), เซนเซอร์, ไดโอดอินทรีย์ (organics diodes), แม่เหล็ก, อุปกรณ์แสง และ photoresists [5]

2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุ

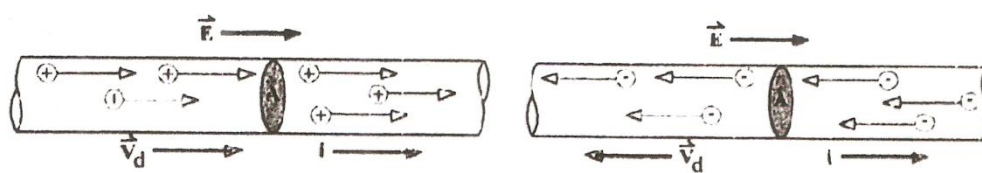
กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางหลายๆ ชนิด เรียกตัวกลางที่มีสมบัติยอมให้ไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านได้ว่าตัวนำไฟฟ้า ขณะที่กระแสไฟฟ้าในตัวนำ แสดงว่ามีการสนาไฟฟ้า ตัวพาประจุในวัสดุ ได้แก่ อิเล็กตรอน เช่น ในวัสดุจำพวกโลหะ โพซิทีฟโฮล(positive holes) เช่น ในวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor materials) และอนุภาคที่มีประจุ (ions) เช่น ในวัสดุเซรามิก [15]

2.1.1 การแบ่งประเภทการนำไฟฟ้าของวัสดุ

วัสดุนำไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของตัวพาประจุได้แก่สารตัวนำไฟฟ้า (Conductor) โลหะทุกชนิดเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) โดยอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่โดยเสรีไม่เป็นระเบียบไม่มีทิศทางแน่นอน เรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์(Brownian motion) ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระทุกตัวจึงเป็นศูนย์ แต่เมื่อทำให้ปลายทั้งสองของแท่งโลหะมีความต่างศักย์ไฟฟ้า เช่น ต่อไว้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในแท่งโลหะ แรงจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ โดยมีความเร็วเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ เรียกว่าความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) จึงมีกระแสไฟฟ้าในแท่งโลหะ[15]



รูปที่2.1 ประจุลบเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแบบสุ่มทำให้ไม่มีกระแสสุทธิ[6]



ก. กระแสพาหะของประจุบวก ข. กระแสพาหะของประจุลบ

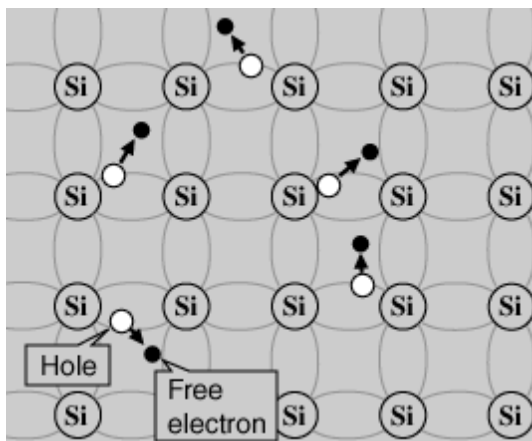
รูปที่ 2.2 แสดงกระแสของประจุไฟฟ้าเมื่อมีสนามไฟฟ้า [6]

2.1.2 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor)

คือสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำกับฉนวนวัสดุส่วนมากในกลุ่มนี้เป็นแข็งประเภทที่อะตอมของธาตุยึดเกาะตัวแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และประเภทพันธะไอออนิก (ionic bond) ตามปกติวัสดุพวกนี้ไม่นำไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ไม่สามารถไหลได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอ แต่ถ้าเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอน เช่น การให้ความร้อน ฉายแสง หรือการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า อิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ได้และทำให้วัสดุนั้นกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า [15]

2.1.3 ชนิดของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า

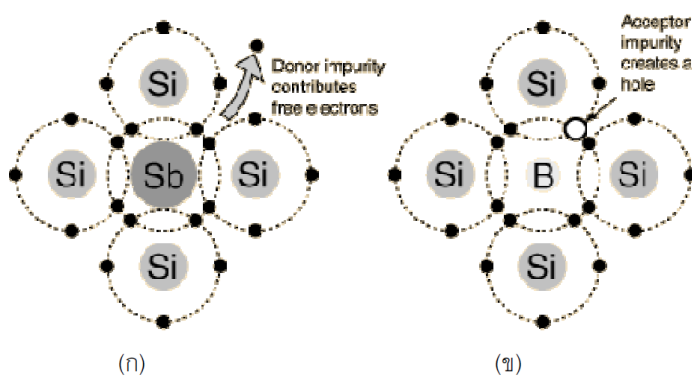
1) สารกึ่งตัวนำเนื้อแท้ (Intrinsic Semiconductor) ในสถานะที่เย็นสารกึ่งตัวนำเนื้อแท้จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเลย หรือพันธะระหว่างอะตอมไม่แตกต่างจากกันแต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พันธะแตก มีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระเกิดขึ้นเป็นคู่ๆ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีคู่อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ไปในเนื้อสารได้ เมื่อคู่ใดมาพบจะเกิดการรวมกันขึ้น สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันดี คือ ซิลิกอน และเจอร์มาเนียม เรียกสารเหล่านี้ว่า สารเตตระเวเลนซ์ [15]



รูปที่ 2.3 อิเล็กตรอนและหลุมในโครงสร้างของซิลิกอน[7]

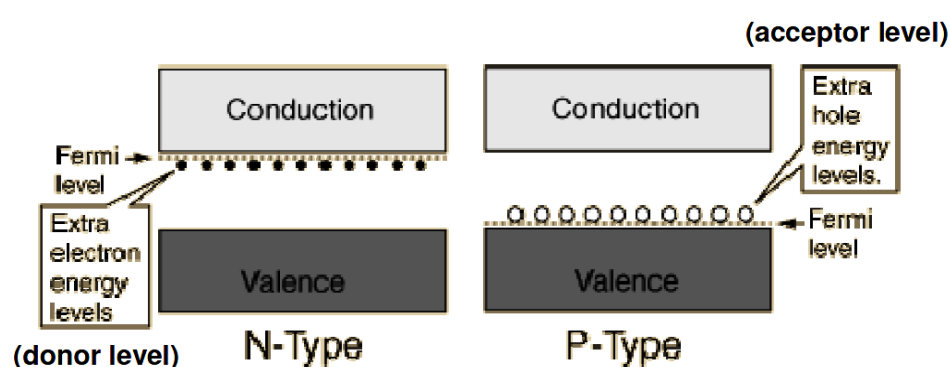
2) สารกึ่งตัวนำกระแสไฟฟ้าดัดแปลง (Extrinsic Semiconductor) สารกึ่งตัวนำซิลิกอนหรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์เมื่อถูกใส่สารอื่นเจือปนลงไปจะทำให้เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำดัดแปลง หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิกมี 2 แบบคือ แบบเอ็นกับแบบพี

2.1) สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N-Type) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว หรือสารเพนตะเวเลนส์ จะมีอิเล็กตรอน 4 ตัว ของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น 1 ตัว เคลื่อนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ การที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ จึงมีการเรียกสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ว่า แบบเอ็น (Negative type) สารที่นำมาเจือปนประเภทนี้เป็นธาตุในหมู่ 5A เช่น อาเซนิก ฟอสฟอรัส และแอนติโมนี



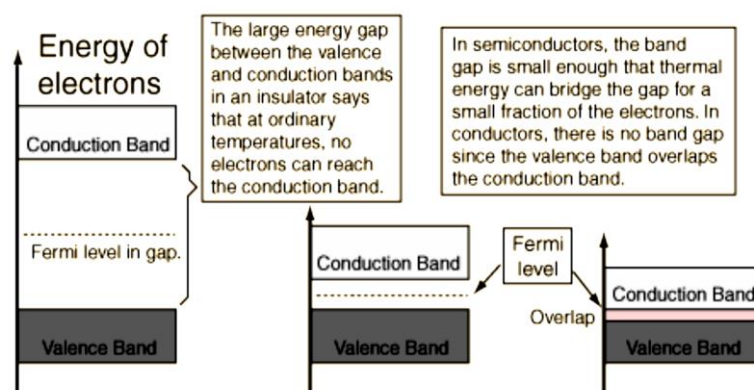
รูปที่ 2.4 (ก) สารกึ่งตัวนำประเภท N (ข) สารกึ่งตัวนำประเภท P [7]

2.2) สารกึ่งตัวนำแบบพี (P-Type) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว หรือสารใดเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอนเพียง 3 ตัวของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำทำให้ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว สำหรับสร้างพันธะกับสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นโฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำคั้งแปลงนี้ การที่มีโฮลอิสระในเนื้อสารทำให้มีการเรียกสารกึ่งตัวนำคั้งแปลงนี้ว่า แบบพี(Positive type)สารที่นำมาเจือปนประเภทนี้เป็นธาตุในหมู่ 3A ได้แก่ อลูมิเนียม แกลเลียม และ โบรอน



รูปที่ 2.5แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบextrinsic [7]

2.3)สารที่เป็นฉนวน (Insulator) วัสดุจำพวกฉนวนไฟฟ้ามีชื่อเรียกอีกอย่างว่าวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) หรือจะเรียกสั้นๆว่าไดอิเล็กตริก(dielectric) ดังนั้นไม่ว่าจะให้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน หรือแสง แก้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็ยังไม่สามารถเข้ามาอยู่ในแถบตัวนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 แสดงแถบพลังงานของ (ก) วัสดุฉนวนไฟฟ้า (ข) วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าและ (ค) วัสดุตัวนำไฟฟ้า[7]

2.2 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity)

ตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) กระแสไฟฟ้า (I) จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V) ที่ใส่เข้าไป แต่จะเป็นปฏิกิริยาส่วนกลับกับความต้านทาน (R) ของตัวนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.1)

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

ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความยาวของตัวนำไฟฟ้า (l) และเป็นปฏิกิริยาส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า (A) ดังสมการที่ (2.2)

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

โดยที่ ρ คือ สภาพการต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับวัสดุแต่ละชนิดที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) จะเป็นปฏิกิริยาส่วนกลับกับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้างี้

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

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[7]

ตารางที่ 2.1 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง[7]

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 ในขณะที่อิเล็กตรอนของตัวนำไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่เป็นระเบียบ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปซึ่งอาจพุ่งชนนิวเคลียสได้ทำให้มีความเร็วลดลง ดังนั้นความเร็วโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่าความเร็วลอยเลื่อนนั้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ดังนี้

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

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

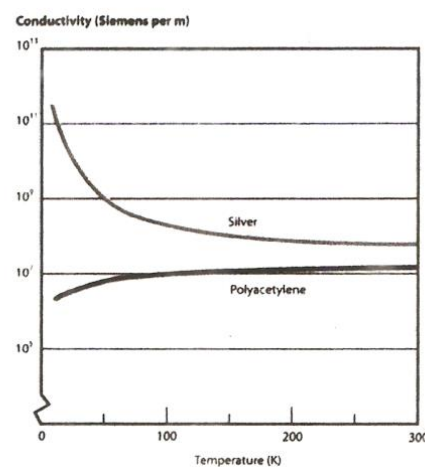
อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งหน่วยปริมาตร ค่าประจุของอิเล็กตรอน ($e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$) และความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (v_d) ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแส (J) จึงมีค่าดังนี้

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

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนอิเล็กตรอนดังนั้น

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

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ นั้น จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการนำไฟฟ้าของวัสดุ



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและโลหะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ [7]

ในกรณีของตัวนำไฟฟ้านั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การชนกันของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสมากขึ้น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดลง สภาพการนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าจึงลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้สามารถข้ามชั้นของ Energy band gap, E_g ได้ต้องอาศัยพลังงานความร้อน โดยที่จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนี้

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

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำจึงเป็นปฏิกิริยากับอุณหภูมิดังนี้

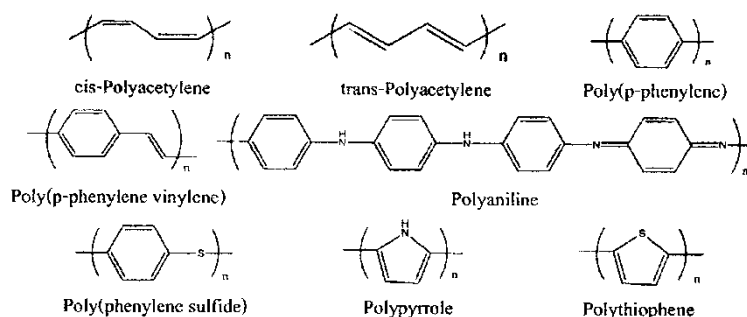
$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g / kT} \quad (2.9)$$

2.3 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [1]

ในปี ค.ศ. 2000 The Royal Swedish Academy of Sciences ได้มอบรางวัล Noble Prize ในสาขาเคมีให้กับนักวิทยาศาสตร์ 3 ท่าน คือ ศาสตราจารย์ Alan J. Heeger แห่งมหาวิทยาลัย California ประเทศสหรัฐอเมริกา ศาสตราจารย์ Alan G. MacDiarmid แห่งมหาวิทยาลัย Pennsylvania ประเทศสหรัฐอเมริกา และศาสตราจารย์ Hideki Shirakawa แห่งมหาวิทยาลัย Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ในเรื่องการค้นคว้าและพัฒนาพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นให้นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้เข้ามาสนใจในวัสดุดังกล่าวนี้มากขึ้น และเอาไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะหลากหลายพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

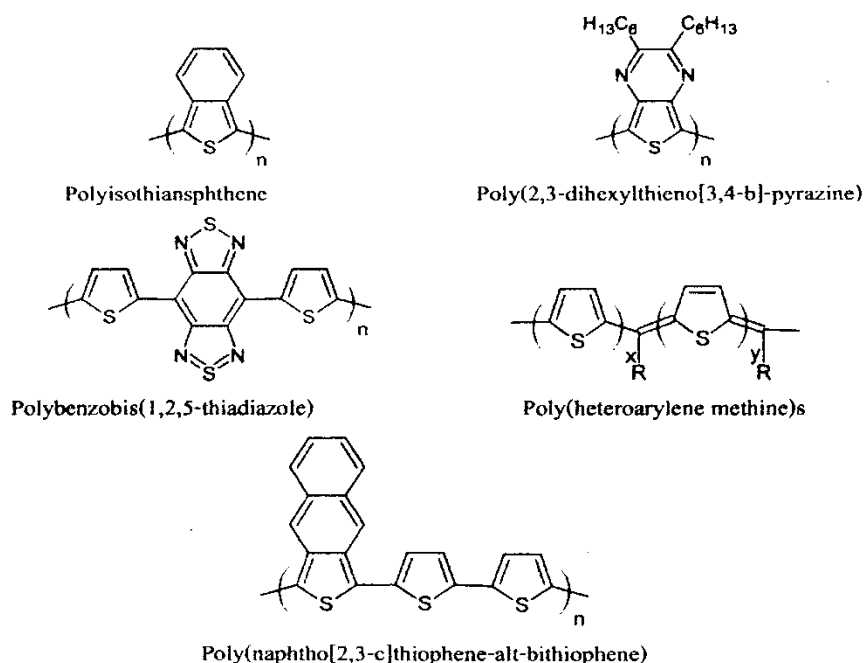
2.3.1 π -Conjugated Linear polymer [16]

ในระบบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโซ่ตรงแบบ π -Conjugated เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิพาราฟินิลีน พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ พอลิไพร์โรล พอลิไซโอฟิน และพอลิอะนิลีน จัดว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุแล้วจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated Linear polymer [16]

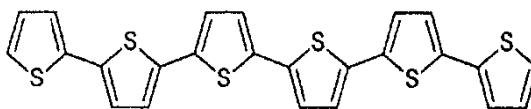
2.3.2 Narrow Band-Gap polymers ในการออกแบบและสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้จุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีค่าแถบพลังงานแคบ จนกระทั่งมีสมบัติเป็นสารประเภทกึ่งตัวนำไฟฟ้าเนื้อแท้ หรืออินทรินซิก ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Narrow Band-Gap polymers [16]

2.3.3 π -Conjugated Linear Oligomers

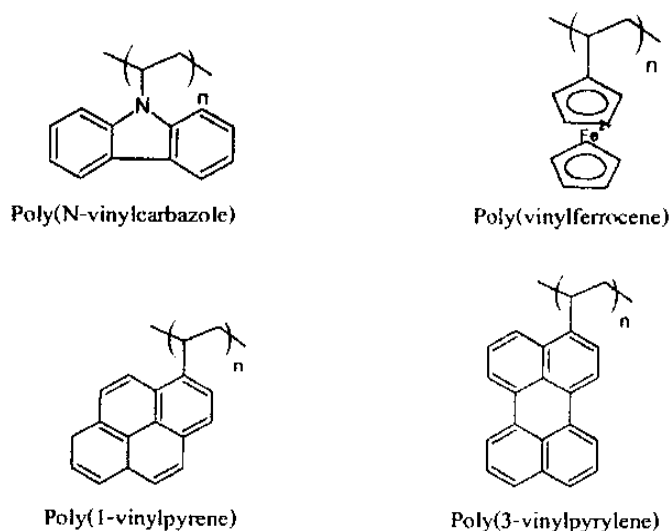
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้ เช่น โอลิโกฟีนิลลีน โอลิโกไซโอฟิน และโอลิโกไพร์โรล



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างโอลิโกไซโอฟิน [16]

2.3.4 Non-conjugated Polymer Containing Pendant π -Electron systems

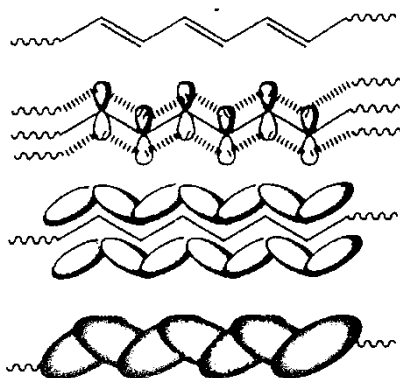
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้มีโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักมีสมบัติเป็นฉนวนโดยที่มีหมู่ข้างเคียงเป็นระบบคอนจูเกต ซึ่งการนำไฟฟ้าในกลุ่มนี้อาศัยการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุที่หมู่ข้างเคียง ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Non-conjugated Polymer Containing Pendant π -Electron systems [17]

2.4 โครงสร้างและกลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีระบบ π -Conjugation อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล กล่าวคือ มีการซ้อนเหลื่อมกันของ p -Orbital ของแต่ละอะตอมส่งผลให้เกิดการ Delocalization ของ Electron ได้

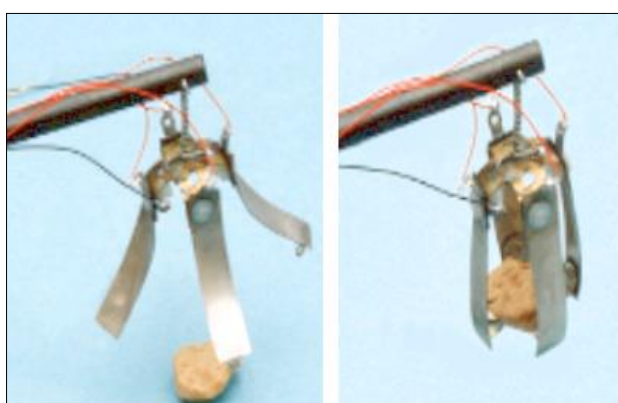


รูปที่ 2.12 การซ้อนเหลื่อมของ Orbital ในระบบ Conjugation [17]

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้รับการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้า (Doping) โดยการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากโครงสร้างโมเลกุล จะทำให้เกิดระดับพลังงาน (Electronic state) ใหม่ขึ้นมา ระหว่างระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่บรรจุอิเล็กตรอน (Highest occupied molecular orbital, HOMO) หรือระดับชั้นพลังงาน Valence band กับระดับชั้นพลังงานต่ำสุดที่ไม่บรรจุอิเล็กตรอน (Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) หรือระดับชั้นพลังงาน Conduction band และโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปเกิดเป็น Hole หรือ Radical cation ที่เรียกว่า Polarons และ Bipolarons ขึ้น ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทประจุในโมเลกุล

2.5 Electroactive Polymer

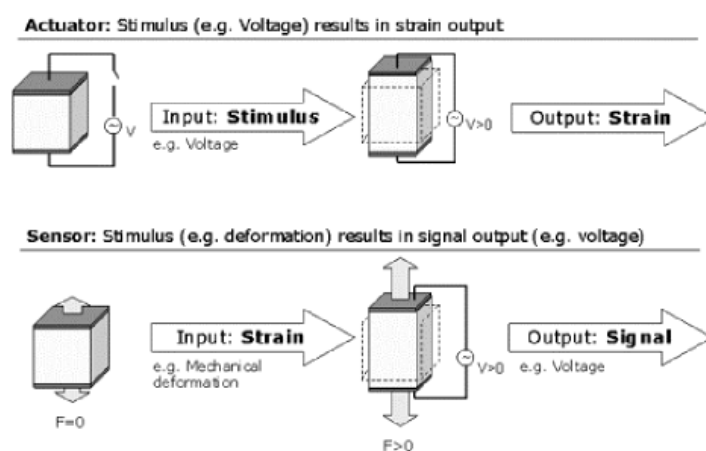
อิเล็กโตรแอคทีฟ โพลีเมอร์(electroactive polymer) [3] หรือEAPsเป็นโพลิเมอร์ที่สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า การใช้งานที่พบบ่อยที่สุดของวัสดุประเภทนี้จะอยู่ในตัวกระตุ้นและเซ็นเซอร์ คุณสมบัติและลักษณะทั่วไปของ EAPสามารถเกิดการเสียรูปร่างได้เมื่อให้แรงกระทำต่อพอลิเมอร์เหล่านี้ วัสดุเหล่านี้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้แทนวัสดุ ceramic piezoelectric ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะสามารถทนแรงได้มากขึ้น โดยมากจะวัดความสามารถในการตอบสนองต่อไฟฟ้าจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอกมีงานวิจัยบางชิ้นพบว่า วัสดุ EAPs บางชนิดสามารถทนต่อความเครียดได้ถึง 380 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสามารถในการตอบสนองมากกว่า ceramic piezoelectric มาก ปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก และความสามารถในการยืดหยุ่น EAPs ในงานพัฒนาวัสดุสำหรับงานหุ่นยนต์ และกล้ามเนื้อเทียมรูปที่ 2.13แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้ EAPs ในการทำแขนเทียมเพื่อหยิบจับสิ่งของ โดยการเลียนแบบมือของมนุษย์ โดยใช้องค์ประกอบที่เรียบง่ายในการสร้างแขนกลขนาดเล็ก แขนกลนี้สามารถยกขึ้นได้จากการม้วนตัวของยางอิเล็กทริกซึ่งมีเหล็กผสมอยู่ในยางนี้ ซึ่งอนุภาคของเหล็กจะอยู่ในรูปของไอออน เมื่อมีการกระตุ้นจากสนามจากภายนอก ไอออนที่อยู่ในยางเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้ว ทำให้เกิดการบิดของยางผสมนี้ ทำให้เกิดการปรากฏการณ์ยกของขึ้นมาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แขนกลขนาดเล็กเลียนแบบมือของมนุษย์[3]

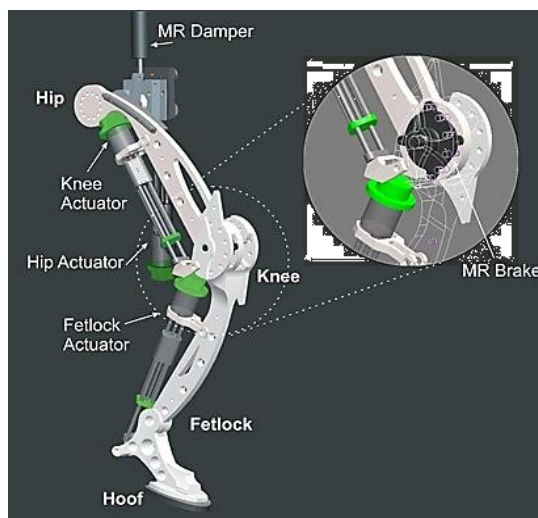
2.6 แอคทูเอเตอร์(Actuator)

แอคทูเอเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่สามารถวัดได้เมื่อมีการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากลม ไฟฟ้า หรือไฮดรอลิก ซึ่งหลักการทำงานของแอคทูเอเตอร์จะตรงข้ามกับหลักการของเซนเซอร์ เนื่องจากเซนเซอร์ การเปลี่ยนแปลงเชิงกลทำให้เกิดสัญญาณหรือพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14กลไกการทำงานของแอคทูเอเตอร์และเซนเซอร์[3]

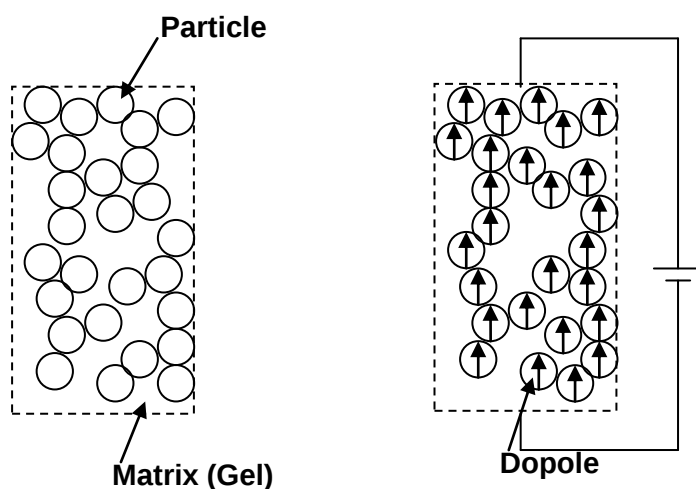
เนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลทำให้แอคทูเอเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในงาน กล้ามเนื้อเทียม คลัทช์รถยนต์ และหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูป 2.15เป็นการประยุกต์ใช้แอคทูเอเตอร์ในการทำหัวเข้าเทียมของมนุษย์ในหุ่นยนต์ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 การประยุกต์ใช้แอกทูเอเตอร์ในการทำหัวเข้าเทียมของมนุษย์ในหุ่นยนต์[3]

2.7 ทฤษฎี One-point dipole

ทฤษฎี One-point dipole เป็นทฤษฎีที่อธิบายกลไกการตอบสนองของระบบที่มีอนุภาคซึ่งสามารถโพลาไลซ์ได้ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุอีลาสโตเมอร์ หรือที่เราเรียกว่าวัสดุ Electrorheological elastomer (ER elastomer) โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าอนุภาคเหล่านี้จะโพลาไลซ์ และถูกเหนี่ยวนำทำให้มีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า แล้วแต่ละอนุภาคจะพยายามดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) แต่เนื่องจากระบบเมทริกซ์อีลาสโตเมอร์เป็นของแข็งอนุภาคจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้อนุภาคที่ถูกโพลาไลซ์ออกแรงผลักไปยังเนื้ออีลาสโตเมอร์ที่อยู่รอบข้าง ส่งผลทำให้ความเครียดของเนื้อพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดการตอบสนองทางไฟฟ้าของระบบ ER elastomer [9,10]

เนื่องจากมีแรงที่พยายามจะดึงคู่กันของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าภายใต้ระบบเมทริกซ์ที่เป็นของแข็งทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าสโตเรจมอดูลัส (storage modulus) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าดังแสดงด้วย สมการ

$$\Delta G' = G'_E - G_0 = \frac{9}{4} C \epsilon_1 k^2 E^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ G'_E คือ ค่าสโตเรจมอดูลัสของวัสดุภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (Pa)

G'_0 คือค่าสโตเรจมอดูลัสของวัสดุที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (Pa)

C คือสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค

ϵ_1 คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ของเมทริกซ์

ϵ_2 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ของอนุภาค

k คือ $(\epsilon_2 - \epsilon_1) / (\epsilon_2 + \epsilon_1)$

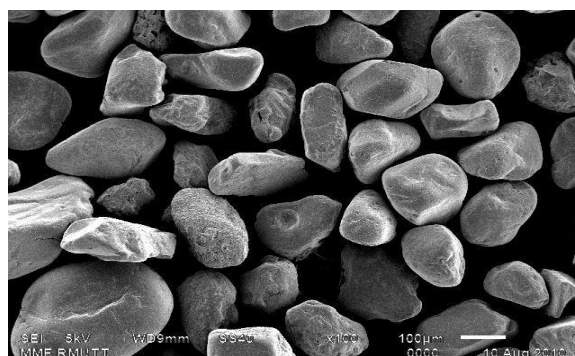
E คือความต่างศักย์ที่กระตุ้นวัสดุผสม (V/mm)

2.8 อนุภาคที่พอลาไรซ์ได้(Polarized particle)

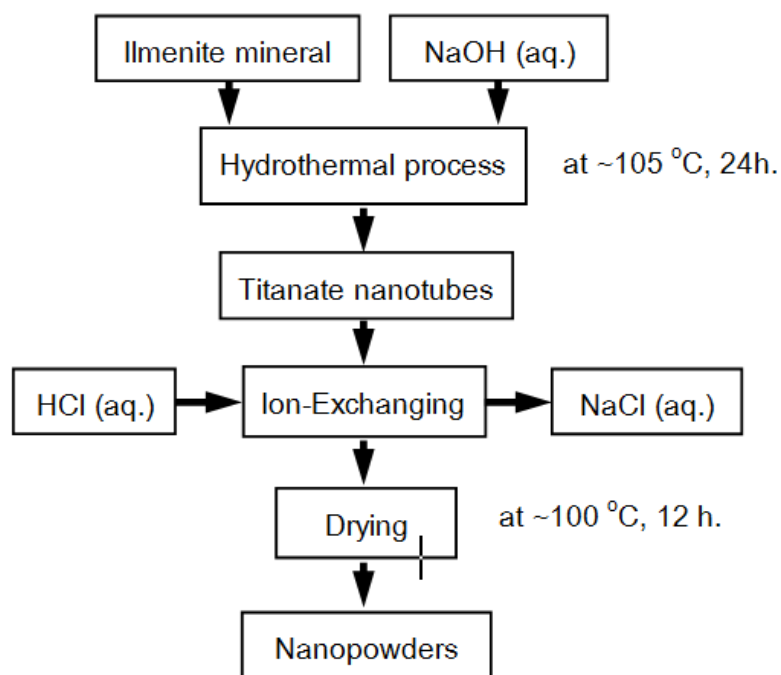
โดยในงานปริญญานิพนธ์นี้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีน, แร่อิมินต์แบบท่อ (Nanotube Ilminite Mineral) แร่อิมินต์แบบเส้นใย และแร่ ลูโคซีน (leucoxene) ซึ่งเป็นอนุภาคที่สามารถพอลาไรซ์ได้เมื่อมีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก จึงเลือกอนุภาคเหล่านี้มาเพื่อเป็นอนุภาคโคโพลินเอน์อย่างสังเคราะห์พอลิไคเมทิลไซลอคเซน เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ขงผสมอนุภาคพอลาไรซ์ได้นี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสโตเรจโมดูลัส และค่าความเครียดของวัสดุก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงความเครียดนี้เองทำให้เกิดการบิดงอของวัสดุผสม ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวได้โดยของคร้วมตลอดทั้งชิ้นงาน จึงมีการประยุกต์ใช้วัสดุผสม ER Elastomer ใช้เป็นงานแอคทูเอเตอร์

2.8.1 แร่อิมินต์แบบท่อ(Nanotube Ilminite Mineral)[12]

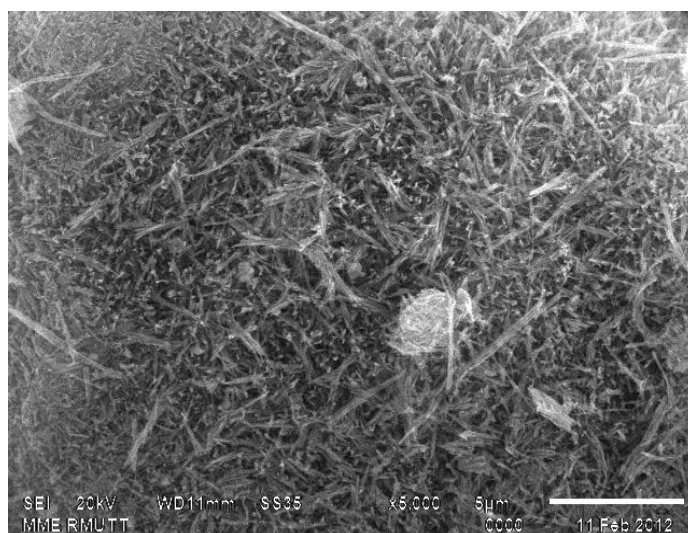
แร่อิมินต์แบบท่อนั้นสามารถเตรียมได้จากวิธีการ ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โดยนำแร่อิมินต์ขนาด 90-250 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เติมนลงในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ จำนวน 2000 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้ว นำสารละลายดังกล่าวใส่ใน เครื่อง Teflon-lined strainless steel autoclave ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องดังแสดงแผนผังการสังเคราะห์ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17รูปถ่ายสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ natural ilmenite granules ขนาด 90-250 ไมโครเมตร [12]



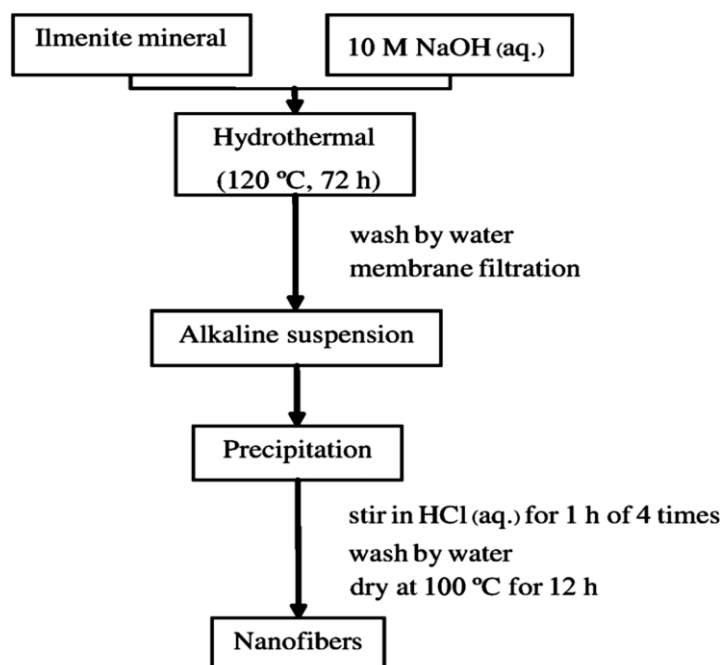
รูปที่ 2.18 การเตรียม Nanotube Ilmenite Mineral [12]



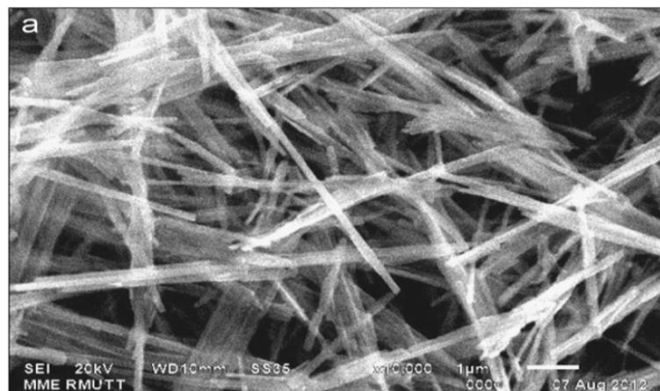
รูปที่ 2.19 รูปถ่ายสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ Nanotube Ilmenite Mineral กำลังขยาย 5,000[12]

2.8.2 เส้นใยแร่อิลิไนต์ขนาดนาโน (Ilmenite Mineral Nanofiber) [13]

เส้นใยแร่อิลิไนต์ขนาดนาโนสามารถเตรียมได้จากวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ด้วยวิธีดังแสดงในแผนผังที่ 2.19 นำแร่อิลิไนต์จากธรรมชาติ 5 กรัม (ปราศจากการฟอก) ใส่ใน Teflon-lined stainless steel autoclave เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หลายๆ ครั้ง และทำการล้างด้วยน้ำกลั่นอีกหลายๆ ครั้งเช่นกัน ต่อจากนั้นทำให้แห้งด้วยลมร้อน



รูปที่ 2.20 การเตรียม Ilmenite Mineral Nanofiber [13]



รูปที่ 2.21 รูปถ่ายสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ Ilmenite Mineral Nanofiber กำลังขยาย 10,000 [13]

2.8.3 เส้นใยแร่ลูโคซีนานาโน (Leucoxene mineral Nanofiber) [8]

เส้นใยแร่ลูโคซีนานาโน ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) โดยใช้การใช้ทราย leucoxene ธรรมชาติ เป็นวัสดุเริ่มต้น ในการสังเคราะห์แบบปกติทั่วไป ใช้แร่ leucoxene ธรรมชาติ (โดยปกติปราศจากการฟอก) ใส่ในเครื่อง Autoclave ขนาด 4 ลิตร จากนั้นเติมสารละลาย NaOH 10 M จำนวน 2ml เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้น นำชิ้นงานมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วตามด้วยการล้างด้วยน้ำกลั่นอีกหลายๆครั้ง ตามลำดับผลิตภัณฑ์ที่ได้จะ จะแข็ง-แห้ง ตัวอย่างจะถูกเผาไหม้เป็นผงที่ลมร้อนที่อุณหภูมิ 100-1000 องศา 2 ชั่วโมง ดังแสดงภาพถ่ายเส้นใยแร่ลูโคซีนานาโน ในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.22 รูปถ่ายสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ เส้นใยแร่ลูโคซีนานาโน (Leucoxene mineral Nanofiber) กำลังขยาย 5,000 [8]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่ประยุกต์ใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในงานแอคทูเอเตอร์

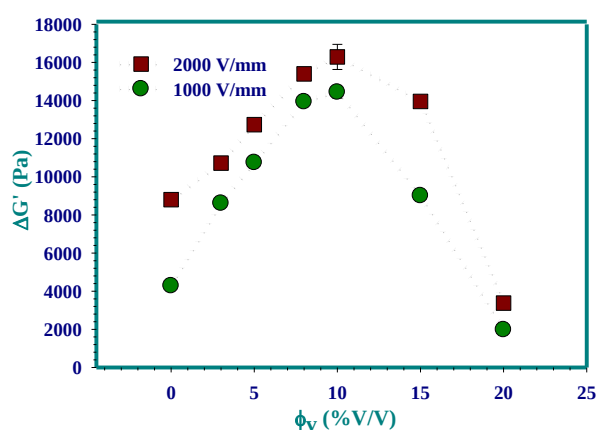
ในปี 2001 กรูซ และคณะ (Krause *et al.*, 2001) ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิอะนิลีนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการเป็นแอคทูเอเตอร์โดยวัดค่าโมดูลัสแบบกดเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกแล้วค่าโมดูลัสของระบบพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ดังนั้นกรูซและคณะจึงสรุปว่าระบบพอลิเมอร์ผสมนี้มีความสามารถที่จะประยุกต์ใช้เป็นแอคทูเอเตอร์ได้[8]

ในปีเดียวกันฟีเซอร์และคณะ (Feheret *et al.*, 2001) ได้ทำการเตรียมวัสดุใหม่สำหรับเป็นแอคทูเอเตอร์โดยทำการผสมวัสดุผสมระหว่าง TiO_2 กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีอัตราการเชื่อมโยงแบบอ่อน โดยเมื่อมีการกระตุ้นวัสดุผสมนี้โดยไฟฟ้าแรงสูง วัสดุผสมนี้สามารถบิดงอได้เมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า 1 – 10 กิโลโวลต์[7]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 เดิมพงษ์และคณะ (Puvanattvattana *et al.*, 2006) เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไทโอฟินและพอลิไอโซพรีนเพื่อศึกษาผลของปริมาณของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของพอลิไทโอฟินเพิ่มขึ้น โมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจาก พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิไทโอฟินมีหน้าที่เป็นสารเติมแต่งในเนื้อพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก [11]

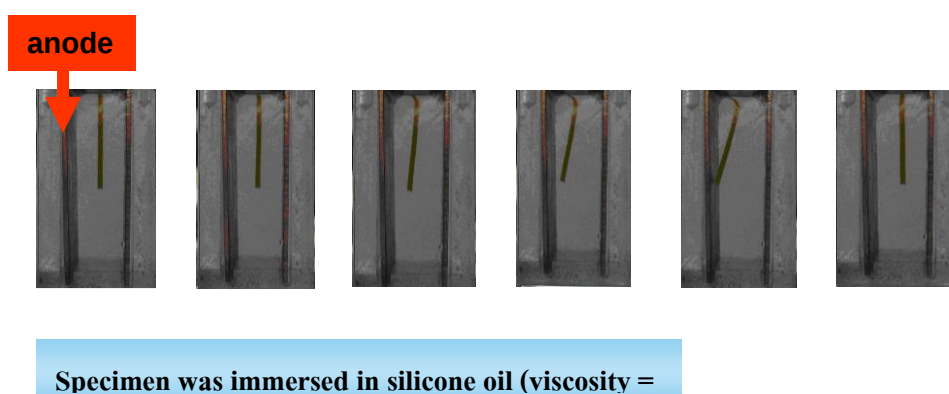
ในปี 2007 สปอนแทคและชาวคณะ (Spontak *et al.*, 2007) ทำการศึกษาอิเล็กโตรแอคทีฟพอลิเมอร์ตอบสนองโดยประจุไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้เป็นสแนมไฟฟ้าด้วยเหตุนี้ความแตกต่างของ EAPs อีออนมักจะต้องใช้ตัวทำละลายปานกลางเกิดการเคลื่อนที่แบบอิเล็กโตรไลต์ และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเพื่อเกิดการกระตุ้นที่สัมพันธ์กับ EAPs อิเล็กทรอนิกส์ การกระตุ้นจะให้เกิดความเครียดที่สูงกว่ามีความทนทานและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น[3]

จากนั้น สุมณมาลย์และชาวคณะ (Niamlanget *al.*, 2009) ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสม พอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และศึกษาผลของปริมาณของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าปริมาณพอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีน 10% โดยปริมาตร นั้นเป็นปริมาณสูงสุดที่จะทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้แสดงการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสได้มากที่สุดเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าภายนอกแสดงดังรูปที่ 2.23 [9-10]



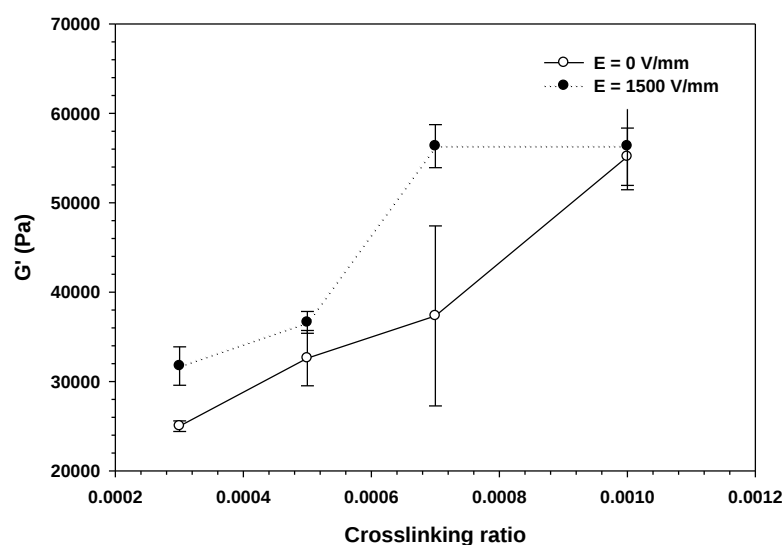
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงค่าสโตเรจโมดูลัสเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกของพอลิเมอร์ผสมพอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน[9-10]

โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกแล้ววัสดุพอลิเมอร์ผสมนั้นมีการบิดงอเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าภายในพอลิเมอร์ผสมแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24การบิดงอของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก[9-10]

สุมนมาลย์ และชาวคณะได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของระบบยางธรรมชาติต่อการตอบสนองการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกนั้นถูกศึกษาในช่วง Linear viscoelastic ที่ความเครียด 1% ช่วงความถี่ 0.1-100 rad/s จากการทดสอบค่าสตอเรจ มอดูลัส ของยางธรรมชาติที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ พบว่าค่าสตอเรจมอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติ และเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกค่าสตอเรจมอดูลัส สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากระบบจะเกิดพอลาไรซ์ที่จุดเชื่อมโยงของสายโซ่ทำให้เกิดพันธะทางกายภาพเกิดขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการบิดโครงสร้าง ค่าสตอเรจ มอดูลัส จึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก และระบบที่มีอัตราการเชื่อมโยงปานกลาง คือ 7×10^{-4} นั้นมีผลการตอบสนองทางไฟฟ้าสูงที่สุดเนื่องจาก มีความยืดหยุ่นอยู่ระหว่างกลางเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่อัตราการเชื่อมโยง 1×10^{-3} และมีพันธะทางกายภาพเกิดขึ้นมากกว่า ระบบที่มีอัตราการเชื่อมโยง 3×10^{-4} และ 5×10^{-4}



รูปที่ 2.25 ค่าสตอเรจมอดูลัสของยางธรรมชาติที่อัตรา การเชื่อมโยง ต่างๆ ในระบบที่มีและไม่มีการกระตุ้นกระแสไฟฟ้าจากภายนอก [14]

ผลทางกายภาพของยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปได้ที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ ที่วัดได้ทั้งในระบบที่มีและไม่มีภาระกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้านั้น พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของยางนั้นเป็นเจลแข็ง ความยืดหยุ่นของยางลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการเชื่อมโยง ซึ่งสอดคล้องกับค่าสตอเรจมอดูลัสของยางที่วัดได้ ด้วยคุณสมบัติความยืดหยุ่น และการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้านี้เองทำให้วัสดุยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปได้เหมาะสมสำหรับเป็นแกนจักรกลอุตสาหกรรม และกล้ำมเนื้อเทียม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและอนุภาคพอลาไรซ์(Polarized particles) ที่ขนาดและ โครงสร้างผลึกต่างๆสำหรับพัฒนาเป็นเป็นวัสดุตอบสนองทางไฟฟ้า

3.1 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1.1 การขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซน[2]

ทำการขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนด้วยการนำพอลิไดเมทิลไซลอกเซนจำนวน 3.68 กรัม ผสมกับ Tetraethyl orthosilicate (TED) และ Dibutyltin dilaurate(Tin) จำนวน 0.04 กรัม ละลายในเพื่อเป็นตัวเชื่อมโยง (Cross-linker) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้เทลงไปในบ่มโม่ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร เพื่อขึ้นรูปพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสม แล้วจึงทิ้งไว้ 1-2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องโดยปริมาณของสารต่างๆที่ใช้เตรียมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนผสมที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่อัตราการเชื่อมโยงต่างๆ

ตัวอย่าง	พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane, PDMS) (g)	ตัวเชื่อมขวาง (Tetraethyl orthosilicate, TED) (g)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (Dibutyltin dilaurate,Tin) (g)	โมลตัวเชื่อมขวาง/ โมลของมอนอเมอร์ (Nc/Nm)
PDMS 1	3.68	0.041	0.04	0.005
PDMS 2	3.68	0.058	0.04	0.007
PDMS 3	3.68	0.083	0.04	0.01
PDMS 4	3.68	0.244	0.04	0.03
PDMS 5	3.68	0.416	0.04	0.05

3.1.2 การขึ้นรูปพอลิไคเมทิลไซลออกเซนผสมอนุภาคพอลาไลซ์ได้

เพื่อทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของสังเคราะห์ผสมที่สัดส่วนการเชื่อมโยง (Nc/Nm) 0.01 มาผสมขึ้นรูปกับกับอนุภาคพอลาไลซ์ที่มีความสามารถในการพอลาไลซ์ต่างกัน คือ เส้นใยขนาดนาโนโนลูโคซีน (Nanofibers from Leucoxene), เส้นใยขนาดนาโนของแร่มิไนต์ (Nanofibers from Ilmenite) และแร่มิไนต์ชนิดท่อขนาดนาโน (Nanotubes from Ilmenite) โดยนำอนุภาคที่พอลาไลซ์ได้มาผสมในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก

3.1.3 การทดสอบการบวมตัว (Swelling test)

การหาอัตราการบวมตัว (Degree of swelling) เป็นการวัดความสามารถในการบวมตัวของพอลิไคเมทิลไซลออกเซนที่สังเคราะห์ขึ้นในสารละลายโทลูอินเป็นเวลา 1, 3 และ 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 คือน้ำหนักของพอลิไคเมทิลไซลออกเซนที่บวมโทลูอิน

M_d คือ น้ำหนักของพอลิไคเมทิลไซลออกเซนที่แห้ง

M_0 คือ น้ำหนักของพอลิไคเมทิลไซลออกเซนก่อนนำไปแช่โทลูอิน

3.1.4 การทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมขวาง (M_c)

เพื่อทดสอบผลของน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมขวางต่อผลการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิไคเมทิลไซลออกเซน พอลิไคเมทิลไซลออกเซนที่ถูกเชื่อมขวางแล้วถูกตัดมาในขนาด 1x1 เซนติเมตร แล้วนำมาแช่ในโทลูอินเป็นเวลา 5 วัน หลังจากนั้นนำมาชั่งในอากาศและในสารละลายเฮปเทนและคำนวณหาขนาดของรูพรุนและน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมขวางดังแสดงในสมการที่ 3.2 – 3.5

$$M_c = \frac{v_1 \rho_2 \left(v_{2m}^{1/3} - \frac{v_{2m}}{2} \right)}{[\ln(1-v_{2m}) + v_{2m} + \chi_1 v_{2m}^2]} \quad (3.2)$$

$$v_{2m} = \frac{w_0}{v_{equil} \times \rho_2} \quad (3.3)$$

$$v_{equil} = \frac{w_0}{\rho_2} + \frac{w_s - w_0}{\rho_1} \quad (3.4)$$

$$\chi = 0.34 + \frac{v_1}{RT} + (\delta_1 - \delta_2)^2 \quad (3.5)$$

เมื่อ

ρ_2 คือ ความหนาแน่นของ PDMS เท่ากับ 0.97 g/cm^3

ρ_1 คือความหนาแน่นของตัวทำละลาย เท่ากับ 0.867 g/cm^3

w_0 คือ น้ำหนักเดิมของพอลิเมอร์

χ คือค่าคงที่ความสัมพัทธ์ระหว่างพอลิเมอร์และสารละลาย (Polymer-Solvent interaction parameter), 0.55152

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ= $8.29 \text{ Nm/mol} \cdot \text{K}$

T คืออุณหภูมิของการทดลอง= 298 K

δ_1 คือความสามารถในการละลายของ (Solubility) ของ PDMS , $19.40 \text{ (MPa)}^{1/2}$

δ_2 คือความสามารถในการละลายของ (Solubility) ของ toluene, $18.20 \text{ (MPa)}^{1/2}$

v_1 คือ molar volume of solvent, $106.2745 \text{ m}^3/\text{mol}$

3.1.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก

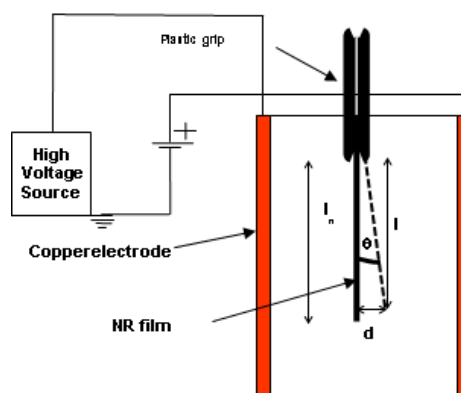
ทดสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงกลเมื่อมีการกระตุ้นจากไฟฟ้าการวัดสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าภายนอกถูกวัดที่อุณหภูมิ 27°C โดยเครื่อง Parallel Plate Rheometer (rheometric scientific Inc, ARES) ชิ้นงานถูกเตรียมมีขนาดความหนาประมาณ 1 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สดอแรก มอดูลัส (Storage modulus) และ ลอสมอดูลัส (Loss modulus) ถูกวัดที่ความถี่แสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 รูปเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงเชิงกลเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

3.1.6 การทดสอบการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก

การโค้งงอของวัสดุภายใต้กระแสไฟฟ้าเป็นการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้ากลอีกวิธีหนึ่งเป็นการศึกษาถึงความยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุเมื่อถูกกระตุ้นหรือเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องทดสอบนั้นจะใช้เซลล์ไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจากแผ่นอะคริลิกภายในเซลล์ประกอบด้วยแผ่นทองแดง 2 แผ่นเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรด (Electrode) ขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตรและความยาว 30 มิลลิเมตรและมีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงทั้งสอง 30 มิลลิเมตรซึ่งแผ่นทองแดงถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) โดยขั้วทองแดงทั้งสองจะจุ่มในน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ที่มีความหนืด 100 cS แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การวัดการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

3.2 อุปกรณ์ และสารเคมี

- 1) เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 2) ชุดเครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปีกเกอร์ กระจกบอกตวง แท่งคนเป็นต้น
- 3) แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปแผ่นทดสอบ (Plate)
- 4) เครื่องมือทดสอบการนำไฟฟ้า
- 5) Polydimethylsiloxane (PDMS)
- 6) α, α' -dichloro-p-xylene
- 7) อนุภาคพอลาไลซ์

7.1) Nanofibers from Leucoxene (As synthesized)

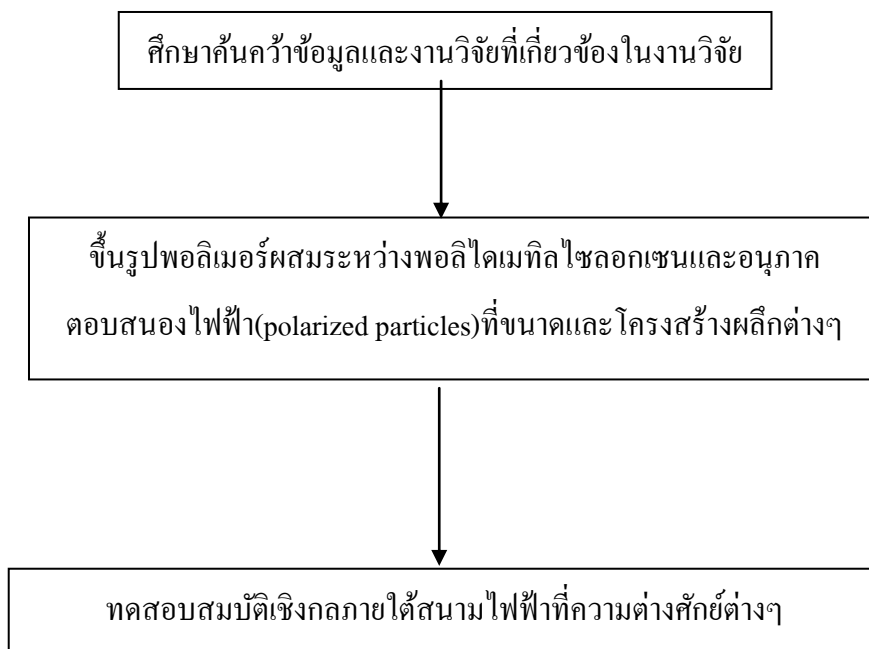
7.2) Nanofibers from Ilmenite (As synthesized)

7.3) Nanotubes from Ilmenite (As synthesized)

8) กล้องดิจิตอล, Sony

- 9) Methanol
- 10) Acetone
- 11) Tetrahydrothiophene (THT)
- 12) Heptane
- 13) Dibutyltin dilaurate (Tin)
- 14) Tetraethyl orthosilicate (TED)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน



ตารางที่ 3.2 แสดงผลการดำเนินงาน

ลำดับ	แผนงาน	สถานะ	เดือน					สถานที่
			ธ.ค.- ม.ค.	ก.พ.- มี.ค.	ธ.ค.- ม.ค.	ม.ค.- มี.ค.	มี.ค.	
1	ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล	Plan	←-----→					อินเทอร์เน็ต ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องสมุดรวม และห้องสมุดจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2	เตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	Plan			←-----→			ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มทร. รัตนบุรี
3	ทดลองทำการสังเคราะห์ทำการสังเคราะห์พอลิพาราฟิน ลีนไวนิลีน และขึ้นรูปชิ้นงานยางในอัตราส่วนที่ ต่างกัน	Plan			←-----→			ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มทร. รัตนบุรี
4	ทำการทดลองและวิเคราะห์คุณสมบัติของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมในระบบที่มีและไม่มีกระแสไฟฟ้า	Plan			←-----→			ห้องทดสอบชิ้นงานภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการมทร. รัตนบุรี และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี
5	รวบรวมผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการ ทดลอง	Plan					←-----→	ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มทร. รัตนบุรี
6	รวบรวมข้อมูลและจัดทำรูปเล่ม	Plan					←-----→	อินเทอร์เน็ต ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องสมุดรวม และห้องสมุดจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย