

# การพัฒนาทางธรรมชาติผสมเพื่อเป็นอุปกรณ์แอกทูเอเตอร์

## Development of Natural Rubber Blend for Actuator Applications

สมุนมาลัย เนียมกลาง<sup>1</sup> วิรัชย์ โรยรินทร์<sup>2</sup> และ อนูวัฒน์ ศิริวัฒน์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3480 โทรสาร 0-2549-3483 E-mail: sumonman\_n@mail.rmutt.ac.th

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: wirachairoynarin@yahoo.com

<sup>3</sup>วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
จังหวัดปทุมธานี 12110 E-mail: anuvat.s@mail.rmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

แอกทูเอเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่สามารถวัด เช่น แรงเชิงกล ความเค้น ความเครียด รูปร่าง หรือขนาด ได้เมื่อมีการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก ไฟฟ้า หรือสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยทั่วไปแอกทูเอเตอร์นำไปประยุกต์ใช้ในงานมอเตอร์ คลัทช์ ลิเนียร์มอเตอร์ หรือแขนหุ่นยนต์ โดยในงานวิจัยนี้ ยางธรรมชาติถูกนำมาผสมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า และขึ้นรูปเป็นพอลิเมอร์ผสมเพื่อนำไปพัฒนาเป็นแอกทูเอเตอร์ ยางผสมนี้ถูกเตรียมขึ้นที่อัตราส่วนร่างแหต่างๆ และถูกทดสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเคลื่อนที่ และแรงที่เกิดขึ้นภายใต้กระแสไฟฟ้า เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับยางผสมนี้ ยางผสมนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้น และเกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force) ขึ้นมา โดยผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั้น เมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก อนุภาคของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าของอนุภาคพอลิเมอร์นำไฟฟ้าถูกโพลาริซ และพยายามจะดึงดูดกันเองในเมทริกซ์ยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุอ่อนนุ่ม ทำให้เกิดการบิดงอเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก นอกจากนี้แรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของยางนั้นถูกวัดที่ความต่างศักย์ต่างๆ เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุ เพื่อพัฒนาความเป็นไปได้ของการใช้ยางธรรมชาติเพื่อเป็นแอกทูเอเตอร์ต่อไป

คำสำคัญ: พอลิเมอร์นำไฟฟ้า, ยางธรรมชาติ, แอกทูเอเตอร์

### Abstract

Actuator is the challenging task that can be responsive in a measurable way through its interaction with some external stimuli. The detectable characteristics can be either physical, mechanical, optical, electrical or magnetic properties while the external stimuli can be any form of energy or matter. Actuator can be used in many applications such as motor or robotic arms. In this present work, the polymer blend between natural rubber and conductive polymer are prepared and investigated the effect of crosslinking ration on electromechanical properties and produced dielectrophoresis force at various electric field strengths

for actuator applications. When the external electric field was applied, the polymer blends are bended because polarized conductive polymer in natural rubber matrix tries to interact each other, dielectrophoresis force is generated.

Keywords: Conductive polymer, Natural rubber, Actuator

### 1. คำนำ

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นแอกทูเอเตอร์ (Actuator) นั้นได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิศวกรรมเช่น มอเตอร์ คลัทช์ กล้ามเนื้อเทียม หุ่นยนต์ โดยแอกทูเอเตอร์นี้จะเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น ความเค้น ความเครียด หรือขนาด เมื่อมีแรงไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้น ทำให้อุปกรณ์ประเภทนี้สามารถสร้างแรงขึ้นมาได้ด้วยตัวของอุปกรณ์เอง โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นแอกทูเอเตอร์นั้นเป็นวัสดุฉลาด เช่น ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) อัลลอยด์ (Alloys) เซรามิก (Ceramic) และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [2]

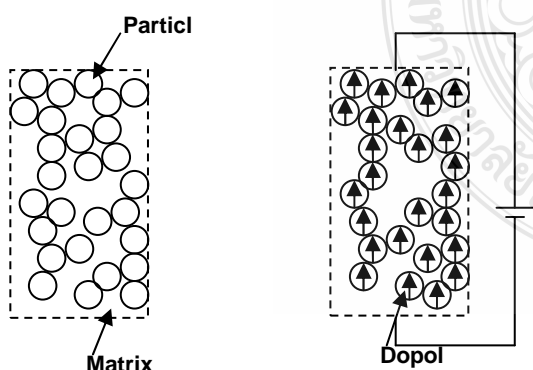
พอลิเมอร์นำไฟฟ้า คือ พอลิเมอร์ที่มีระบบคอนจูเกตตลอดสายโซ่ และสามารถเปลี่ยนสถานะออกซิเดชันเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก จากคุณสมบัติที่โดดเด่นของพอลิเมอร์นำไฟฟ้านี้เองทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดดเด่นมากที่จะพัฒนาเป็นวัสดุฉลาด อีกทั้งพอลิเมอร์นำไฟฟ้านี้มีน้ำหนักเบา ราคาถูก สังเคราะห์ง่าย เวลาในการตอบสนองกระแสไฟฟ้าน้อย และให้การตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้ามาก เมื่อเทียบกับวัสดุฉลาดชนิดอื่น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจพอลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีน (poly(p-phenylene vinylene)) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าสูงและง่ายต่อการสังเคราะห์ มาพัฒนาเป็นวัสดุฉลาดเพื่อใช้ในงานแอกทูเอเตอร์ แต่เนื่องจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดนี้มีข้อเสียเรื่องความสามารถในการละลายต่ำ ทำให้ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ยาก เพื่อปรับปรุงข้อด้อยของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิพาราฟีนิลีนไวนิลีนในเรื่องคุณสมบัติการขึ้นรูป การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมกับวัสดุที่มีความสามารถในการตอบสนองไฟฟ้าชนิดอื่นและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ดังนั้นวัสดุอิเล็กโตรแอคทีฟโพลีเอสโตเมอร์ (Electroactive elastomer) หรือวัสดุอีลาสโตเมอร์ที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าภายนอก [5-7] ถูกเลือกเป็นวัสดุเมทริกซ์สำหรับพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อพัฒนาเป็นแอกทูเอเตอร์ ที่

สามารถควบคุมด้วยไฟฟ้า โดยยางธรรมชาติเป็นวัสดุเล็กโตรแอคทีฟโพลีเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถผลิตจากน้ำยางพาราซึ่งสามารถเพาะปลูกได้ในประเทศ ราคาไม่สูงมาก เพื่อเป็นการพัฒนาการประยุกต์ใช้ยางพาราซึ่งเป็นผลผลิตทางเกษตรกรรมของประเทศให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น อนึ่งการพัฒนาโพลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติและโพลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิพาราฟินิลีนไวนิลินนั้นจะ ช่วยแก้ปัญหาการขึ้นรูป และความยืดหยุ่นของโพลิเมอร์นำไฟฟ้า นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มการตอบสนองทางไฟฟ้ารวมของระบบอีกด้วย จากคุณสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของโพลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของโพลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้เกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force) [11]นี้เป็นแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง ดังนั้นวัสดุผสมนี้จึงถูกเตรียมและพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างวัสดุฉลาดตัวใหม่ในการรองรับการสร้างอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์ที่ใช้พลังงานน้อย และควบคุมการเคลื่อนไหวได้ด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง (แบตเตอรี่) โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากปีโตรเลียม

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎี One-point dipole

ทฤษฎี One-point dipole เป็นทฤษฎีที่อธิบายกลไกการตอบสนองของระบบที่มีอนุภาคซึ่งสามารถโพล่าไรซ์ได้ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุอีลาสโตเมอร์ หรือที่เราเรียกว่าวัสดุ Electrorheological elastomer (ER elastomer) โดยเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าอนุภาคเหล่านี้จะโพล่าไรซ์ และถูกเหนี่ยวนำทำให้มีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า แล้วแต่ละอนุภาคจะพยายามดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) แต่เนื่องจากระบบเมทริกซ์อีลาสโตเมอร์เป็นของแข็งอนุภาคจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้อนุภาคที่ถูกโพล่าไรซ์ออกแรงผลักไปยังเนื้ออีลาสโตเมอร์ที่อยู่รอบข้าง ส่งผลให้ความเครียดของเนื้อโพลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า ทำให้เกิดการบิดงอ และเกิดแรงขึ้น [5, 6] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กลไกการเกิดการตอบสนองทางไฟฟ้าของระบบ ER elastomer)

เนื่องจากมีแรงที่พยายามจะดึงดูดกันของโพลิเมอร์นำไฟฟ้าภายใต้ระบบเมทริกซ์ที่เป็นของแข็งทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าสโตเรจโมดูลัส (storage modulus) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าดังแสดงด้วยสมการที่ 1

$$\Delta G' = G'_E - G_0 = \frac{9}{4} C \epsilon_1 k^2 E^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $G'_E$  คือ ค่าสโตเรจโมดูลัสของวัสดุภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (Pa)

$G_0$  คือ ค่าสโตเรจโมดูลัสของวัสดุที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (Pa)

C คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค

$\epsilon_1$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ของเมทริกซ์

$\epsilon_2$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ของอนุภาค

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

E คือ ความต่างศักย์ที่กระตุ้นวัสดุผสม (V/mm)

โดยในงานนี้โพลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิพาราฟินิลีนไวนิลิน คือ อนุภาคที่โพล่าไรซ์ได้ และยางธรรมชาติ คือ อีลาสโตเมอร์เมทริกซ์ นอกจากค่าสโตเรจโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกแล้วค่าความเครียดของวัสดุก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงความเครียดนี้เองทำให้เกิดการบิดงอของวัสดุผสม ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวได้โดยองค์รวมตลอดทั้งชิ้นงาน จึงมีการประยุกต์ใช้วัสดุผสม ER Elastomer ใช้เป็นงานแอคทูเอเตอร์

### 2.2 ทฤษฎี Dielectrophoresis force

เมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกแล้วนั้น วัสดุผสม ER Elastomer จะสามารถบิดงอได้ การบิดงอของวัสดุนี้ทำให้เกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force) ซึ่งแรงชนิดนี้มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นยกกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 2 [10, 11]

$$\rho_f = \frac{f_{DEP}}{r^2 \pi} = \frac{CVV}{r^2 \pi d} = const V^2 \quad (2)$$

โดย  $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของแรง (N/cm<sup>2</sup>),

$f_{DEP}$  คือ แรงที่เกิดจากการบิดงอของวัสดุ, แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force, N)

r คือ รัศมีของชิ้นงานรูปทรงระบอบ (cm)

C คือ capacitance (C/V),

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น (V)

D คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

## 3. วิธีการทดลอง

### 3.1 การเตรียมยางผสมพอลิพาราฟินิลีนไวนิลินและยางธรรมชาติ

#### 3.1.1 การสังเคราะห์พอลิพาราฟินิลีนไวนิลิน [1]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิพาราฟินิลีนไวนิลินถูก

สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี Sulfonium precursor โดยนำสาร  $\alpha, \alpha'$ -dichloro-p-xylene 10 กรัมผสมกับ tetrahydrothiophene 15 มิลลิลิตร ในสารละลายเมทานอล 150 มิลลิลิตร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมสารละลายอะซิโตนลงไปเพื่อหยุดปฏิกิริยาและตกตะกอนเกลือซัลโฟเนียมออกมา (Sulfonium salt) หลังจากนั้นนำเกลือที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายเมทานอลที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งจะสังเคราะห์ Sulfonium precursor ได้ หลังจากนั้นนำ Sulfonium precursor ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมงภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อได้โพลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิพารา

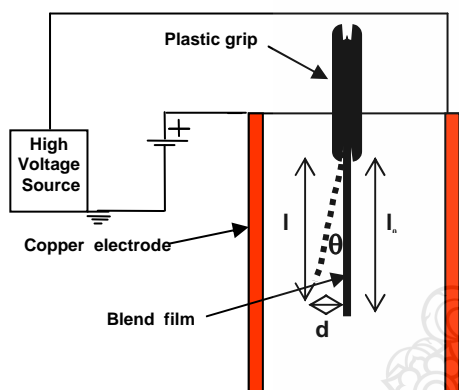
พินิลีนไวไนนีลีนออกมา หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปบดเพื่อนำไปผสมกับยางธรรมชาติ

### 3.1.2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมพอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีสและยางธรรมชาติ

ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมถูกขึ้นรูปด้วยการนำน้ำยางธรรมชาติผสมกับพอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีน และสารไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงที่ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างๆ (2, 5 และ 7% โดยน้ำหนัก) นำของเหลวผสมนี้ไปขึ้นรูปในโมลด์ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร และนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ความดัน 5 MPa นาน 5 นาที [5]

### 3.2 การวัดการบิดงอของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าภายนอก

การวัดการบิดงอ เพื่อทำการบิดงอของพอลิเมอร์ผสม แผ่นพอลิเมอร์ผสมถูกตัดให้มีขนาด 40 x30 x1 มิลลิเมตร ชิ้นงานถูกจุ่มลงในน้ำมันซิลิโคนที่บรรจุอยู่ในเซลล์อะคริลิกที่มีอิเล็กโทรดทองแดงประกบอยู่ทั้งสองข้างของเซลล์ จากนั้นไฟฟ้าแรงสูงถูกกระตุ้นโดยผ่านอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2

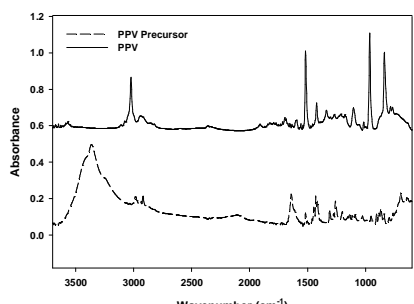


รูปที่ 2 การวัดการบิดงอของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าภายนอก [11]

## 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

### 4.1 การสังเคราะห์พอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีน

ในงานวิจัยนี้ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีน ส ถูกสังเคราะห์ผ่าน sulfonium precursor โดยสามารถตรวจสอบความสำเร็จของการสังเคราะห์พอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีนได้จากการวิเคราะห์หมู่โครงสร้างด้วยเครื่องมือ FTIR-spectroscopy ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 FTIR spectrum ของ sulfonium precursor ของ poly(p-phenylene vinylene) และ poly(p-phenylene vinylene)

จากรูปที่ 3 พบว่า หลังจากนำ sulfonium precursor มาผ่านขบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมงแล้วนั้น หมู่ Sulfonium ก็หลุดออกไป ดังแสดงได้ของการหายไปของพีคช่วงกว้างตั้งแต่ 3100 – 3500 cm<sup>-1</sup> ได้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีน (Poly(p-phenylene vinylene), PPV) [3] นอกจากนั้นยังสามารถยืนยันการสังเคราะห์ได้ของพอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการดูคลื่นช่วงคลื่นที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 1

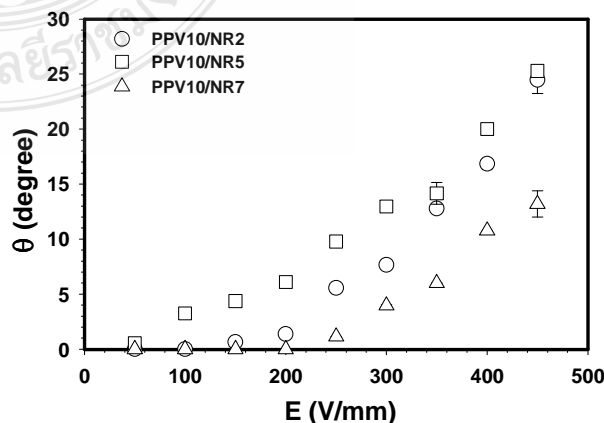
ตารางที่ 1 FTIR Spectrum [3]

Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	Structure
3022	trans vinylene C-H stretching
550	phenylene out of plane ring bending
830	p- phenylene ring C-H out of plane bending
1511	C-C ring stretching

พอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีนที่สังเคราะห์ไปบดด้วยเครื่อง Ball mill แล้วทำการคัดกรองขนาดของอนุภาคด้วยตะแกรงร่อน และได้อนุภาคพอลิพาราฟิไนลีนไวไนนีลีนขนาดเฉลี่ย 46 ± 4 μm

### 4.2 การบิดงอของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าภายนอก

เพื่อเป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเครียดเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก โดยสามารถวัดได้จากการบิดงอของพอลิเมอร์ผสม (d) และค่าองศาการบิดงอ (θ) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ โดยพบว่าทูลการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสมนั้น องศาการบิดงอจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเกิดการโพล่าไรซ์ และอนุภาคที่ถูกโพล่าไรซ์นี้เองพยายามดึงดูดกันทำให้เกิดการบิดงอของวัสดุ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าโพล่าไรซ์ที่สร้างขึ้นก็มีความแข็งแรงขึ้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์นำไฟฟ้านี้เพิ่มมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างองศาการบิดงอและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้นให้กับวัสดุผสม

องศาการบิดงอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงจาก 2 % โดยน้ำหนัก เป็น 5 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มจุดเชื่อมโยงในเนื้อวัสดุนั้นเป็นการเพิ่มจุดที่สามารถโพลาลิไซส์ได้เมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเช่นกัน ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มจุดการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติ ก็ทำให้เกิดการบิดงอเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มอัตราการเชื่อมโยงเป็น 7% โดยน้ำหนัก กลับพบว่าการบิดงอลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากความสามารถในการบิดงอของเนื้อวัสดุลดลงด้วยเมื่อมีการเพิ่มอัตราการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติ กล่าวคือ ยางธรรมชาติจะมีความแข็งมากขึ้น หรือความเป็นอีลาสติกลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเชื่อมโยง ทำให้การบิดงอของวัสดุผสมลดลงด้วย [10]

จากนั้นแรงไดอิเล็กโตรโพลีซิสถูกคำนวณด้วยสมการที่ 3 [11]

$$F_D = mg \sin \theta + F_d \quad (4)$$

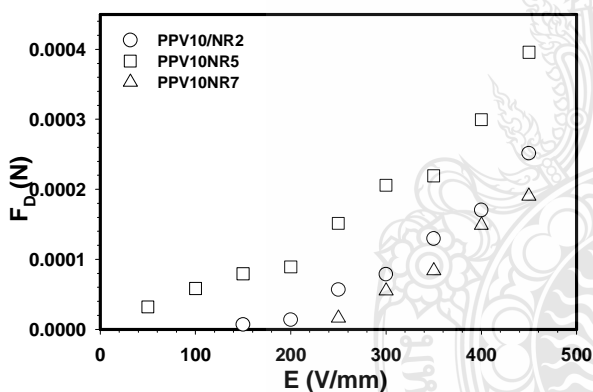
โดย  $F_D$  คือ แรงไดอิเล็กโตรโพลีซิส (N)

$F_d$  คือ แรงอีลาสติกของการบิดงอซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

ทฤษฎี linear elasticity (N)

$m$  คือ มวลของชิ้นงานวัสดุผสม (g)

พบว่าแนวโน้มของแรงไดอิเล็กโตรโพลีซิสนั้นเป็นทิศทางเดียวกับองศาการบิดงอ คือ แรงไดอิเล็กโตรโพลีซิสที่สร้างขึ้นนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงไดอิเล็กโตรโพลีซิสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้นให้กับวัสดุผสม

## 5. สรุป

พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิพาราฟีนีลีนไวนิลินนี้ ถูกสังเคราะห์และขึ้นรูปเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์ โดยพบว่าเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอกแล้วนั้นวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดทำให้โครงสร้างวัสดุโดยรวมเกิดการบิดงอขึ้น โดยการบิดงอนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่กระตุ้นให้วัสดุนี้ เนื่องด้วยการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้านี้ทำให้เกิดภาวะไดโพลที่แข็งแรงมากขึ้นของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ทำให้อนุภาคพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ถูกโพลาลิไซส์ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดึงดูดกันเอง ทำให้เกิดการบิดงอเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การบิดงอของวัสดุยางธรรมชาติผสมนี้ก่อให้เกิดแรงอีกด้วย ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้คือแรงไดอิเล็กโตรโพลีซิส ซึ่งแรงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานแอคทู

เอเตอร์ ลิเนียร์มอเตอร์ เพื่อขับเคลื่อนระบบแนวเส้นตรง โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากปิโตรเลียม โดยคณะผู้วิจัยหวังว่าวัสดุผสมชนิดใหม่นี้จะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการทำแอคทูเอเตอร์ หรือลิเนียร์มอเตอร์ที่สามารถควบคุมได้แม่นยำ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติในการสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Burn, B., Bradley, D., Friend, R. H., and Halliday, D.A., (1992). Precursor route chemistry and electronic properties of poly (p-phenylenevinylene), poly[(2,5-dimethyl-p-phenylene) vinylene] and poly[(2,5-dimethoxy-p-phenylene) vinylene]. *Chem. Soc. Perkintrans. 1*, 3225-3231.
- [2] Cakmak, G., Kucukyavuz, Z., Kucukyavuz, S. and Cakmak, H., (2004). Mechanical, electrical and thermal properties of carbon fiber reinforced poly(dimethylsiloxane)/polypyrrole composites. *Composites: Part A*. 35, 417-421.
- [3] Cirpan, A., Küçükyavuz, Z. and Küçükyavuz, S., (2003). Synthesis, Characterization and Electrical Conductivity of Poly(p-phenylene vinylene). *Turk. J. Chem.* 27, 135 – 144.
- [4] Damlin, P., Kvarstrom, C., Petr, A., EK, P., Dunsch, L. and Ivaska, A. (2002). In situ resonant Raman and ESR spectroelectrochemical study of electrochemically synthesized poly(p-phenylenevinylene) *J. Solid state electrochem.* 6, 291-301
- [5] Faez, R., Schuster, R-H., and De Paoli, M-A. (2002). A conductive elastomer based on EPDM and polyaniline II. Effect of the crosslinking method. *European Polymer Journal*, 38, 2459-2463.
- [6] Filipcsei, G., Feher, J., Zrinyi M. (2000). Electric field sensitive neutral polymer gels. *J. Mol. Struct.* 2000, 554, 109-117.
- [7] Gere, J., Timashenko, S. (1991) *"Mechanics of Materials"* 3<sup>rd</sup>, Chapman & Hall, United Kingdom, 514 - 517
- [8] Gorur, R. (2003). "Dielectrics in Electric Fields" Marcel Dekker Inc. New York 1-277
- [9] Jung, Y., Park, H., Jo, N. and Jeong, H. (2007). Fabrication and performance evaluation of diaphragm-type polymer actuators using segmented polyurethane according to chemical-hard-segment content. *Sensor Actuat. A-Phy*.136, 367-373.
- [10] Niamlang, S., Sirivat, A. (2008) "Electromechanical responses of a crosslinked polydimethylsiloxane", *Macromolecular Symposia*, 264, 176-183, 2008.
- [11] Niamlang, S., Sirivat, A. (2008) "Dielectrophoresis force and deflection of electroactive poly(phenylene vinylene)/polydimethylsiloxane Blends", *Smart Materials and Structures*, 17, 035036