



แอกชูเอเตอร์จากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

Actuator based on Conducting Polymers

วิจิตรา เจนวิริยะกุล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

E-mail: wijiji@kku.ac.th

บทคัดย่อ

นักวิจัยต่างค้นคว้าเพื่อพัฒนาเครื่องจักรกลที่สามารถทำงานเลียนแบบสิ่งต่างๆ ที่เราพบเห็นตามธรรมชาติ การค้นคว้าพัฒนาแอกชูเอเตอร์ที่ทำงานเสมือนกล้ามเนื้อสิ่งมีชีวิตก็เช่นเดียวกัน แต่ยังไม่มียุคเทคโนโลยีใดสามารถสร้างอุปกรณ์ที่มีพฤติกรรมเสมือนกล้ามเนื้อจริงเลย อย่างไรก็ตามมีการศึกษาเพื่อนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น พอลิไพโรล และพอลิอะนิลีน เป็นต้น มาประยุกต์เป็นแอกชูเอเตอร์สำหรับสิ่งมีชีวิต กลไกการทำงานเป็นแอกชูเอเตอร์ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนเข้า-ออกจากแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ตามรอบของการกระตุ้นทางไฟฟ้า โดยการแพร่ของไอออนเกิดจากสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของสารเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ซึ่งสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า ค่ามอดูลัส และความแข็งแรง จะส่งผลต่อค่าความเครียดและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด นอกจากนี้สภาพแวดล้อมทางเคมี เช่น ชนิดของไอออน ความเข้มข้น และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ก็มีผลต่อค่าความเครียดและค่าช่วงชีวิตของแอกชูเอเตอร์เช่นกัน

ABSTRACT

Researchers seek to develop machines that mimic systems that are wildly seen in nature. In the case of developing “muscle like” actuators, there is a significant lack of actuator technologies that behave as real muscle. However, conducting polymers such as polypyrrole and polyaniline are studied as a novel biologically inspired actuator. The actuation mechanism of these materials depends upon the motion of ions in and out of the bulk polymer film during electromechanical cycling. The diffusion of ions into the film causes the dynamic mechanical and electrical properties of materials change during oxidation and reduction reaction. The physical properties of the polymer such as electrical conductivity, modulus and porosity have

significant influence on the overall strain and strain rate that can be achieved. In addition, the chemical environment such as the ion type, concentration and electrolyte can influence the strains and lifetime of the actuator.

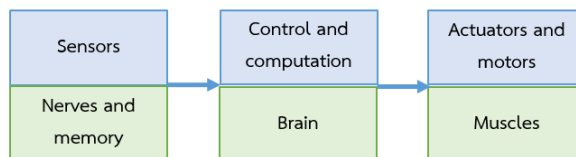
คำสำคัญ:

Keywords: Conducting polymer, Actuator, Artificial muscle, Polypyrrole

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา งานวิจัยค้นคว้าทางด้านวัสดุศาสตร์และเทคโนโลยีมีความเจริญก้าวหน้าไปมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาวัสดุฉลาด (intelligent material หรือ smart materials) เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในอนาคต หลักการทำงานของวัสดุฉลาดที่ได้คิดค้นขึ้นมานั้นจะมีพฤติกรรมตามรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมภายนอก หน่วยรับความรู้สึกจะทำงานแล้วส่งผลให้เกิดการตอบสนองตามรูปแบบของวัสดุนั้น วัสดุฉลาดมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เซนเซอร์ (sensor) และ แอคชูเอเตอร์ (actuator) โดยทั้ง 2 ส่วนนี้จะมีการทำงานที่สัมพันธ์กัน เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับพบการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หรือการส่งสัญญาณที่แตกต่างจากเดิม เช่น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น อุณหภูมิ ความแรงสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก เป็นต้น จากนั้น แอคชูเอเตอร์จะทำหน้าที่ตอบสนองต่อสิ่งที่มีมากระตุ้น โดยการปรับเปลี่ยนรูปร่าง ตำแหน่ง ความถี่ หรือสมบัติ

เชิงกล ตามการเปลี่ยนแปลงการกระตุ้นนั้นๆ ซึ่งการทำงานที่สอดคล้องกันนี้ใกล้เคียงกับการทำงานของอวัยวะของสิ่งมีชีวิต แต่อย่างไรก็ตามกลไกการทำงานของสิ่งมีชีวิตนั้นมีความสลับซับซ้อนกว่านี้มาก เราสามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายขึ้นดังรูปที่ 1

สารที่ใช้ในการสร้างกล้ามเนื้อเทียมนั้นแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 2 ประเภท คือ กลุ่มแรกเป็นสารที่มีการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือเรียกว่า “Electronic electroactive polymers หรือ EAPs” สารที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ dielectric elastomer actuators (DEAs), relaxer ferroelectric polymers และ liquid crystal elastomers (Bar-Cohen, 2007) เป็นต้น สำหรับสารที่ใช้สร้างกล้ามเนื้อเทียมกลุ่มที่สองจะมีไอออนเป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าและออกทำให้สารเกิดการพองตัวและหดตัวได้ ซึ่งสารในกลุ่มนี้เรียกว่า “ionic EAPs” หรือ “wet EAPs”



รูปที่ 1 แสดงการทำงานของเซนเซอร์ ส่วนควบคุมและประมวลผล และส่วนตอบสนองหรือแอคชูเอเตอร์ซึ่งเลียนแบบการทำงานของกล้ามเนื้อสิ่งมีชีวิต

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างกล้ำเนื้อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mirfakhrai et al., 2007)

สมบัติ	ค่าปกติ	ค่าสูงสุด
Strain (%)	20	> 40
Stress (MPa)	0.1 (sustainable)	0.35
Work density (kJ/m ³)	8	
Density (kg/m ³)	1037	
Strain rate (%/s)		500
Power to mass (W/kg)	50	200
Efficiency (%)		40
Cycle life		10 ⁹
Modulus (MPa)	10–60	

โดยสารที่นำมาใช้เป็นแอคชูเอเตอร์จะมีสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับสัญญาณกระตุ้นจากภายนอก และต้องมีการตอบสนองที่ดีในเวลาที่เหมาะสม ไม่ใช่เวลาในการตอบสนองช้าหรือเร็วเกินไป นั่นแสดงให้เห็นว่า เราสามารถควบคุมการตอบสนองที่เหมาะสมได้ ซึ่งสารที่มีสมบัติพิเศษดังที่กล่าวมาได้แก่ shape memory alloys (Mohd Jani et al., 2014), piezoelectric ceramics (Jaffe, 1958), magnetostrictive materials (Olabi and Grunwald, 2008), และ electrorheological/ magnetorheological fluids (El Wahed et al., 2002) เป็นต้น ตัวอย่างการทำงานของสาร shape memory alloys จะเกิดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและกลับคืนสู่รูปร่างเดิมเมื่อกระตุ้นด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ถึงแม้จะมีการวิจัยคิดค้นและนำองค์ความรู้ต่างๆ มาพัฒนาต่อยอดการทำงานของแอคชูเอเตอร์ แต่นักวิจัยยังไม่สามารถประดิษฐ์แอคชูเอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการทำงานของกล้ำเนื้อสิ่งมีชีวิตได้เลย

ช่วงที่ผ่านมา งานวิจัยทางด้านพอลิเมอร์มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์มีข้อดีคือ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีน้ำหนักเบา จึงมีการนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย พอลิเมอร์ส่วนมากมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อเทียบกับโลหะ จึงไม่เป็นสนิม การปรับปรุงการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 3 วิธีคือ 1) การเติมไอออนลงในพอลิเมอร์ 2) การทำเป็นของผสมระหว่างสารที่นำไฟฟ้าและสารพอลิเมอร์ 3) การกระตุ้น (doping) แต่ในปี ค.ศ. 1977 ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymers) ตัวแรกขึ้นมา นั่นคือ พอลิอะเซทิลีน (Chiang et al., 1977) หรือเรารู้จักพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในนาม โลหะสังเคราะห์ (synthetic metals) ซึ่งทำให้ผู้ค้นพบทั้ง 3 ท่าน คือ Shirakawa, Macdiarmid และ Heeger ได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2000

พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene PA) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างอย่างง่ายที่สุด คือสายโซ่พอลิเมอร์ประกอบด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมเป็นพันธะคู่และพันธะเดี่ยวสลับกัน นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์อีกหลายตัวที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า ได้แก่,

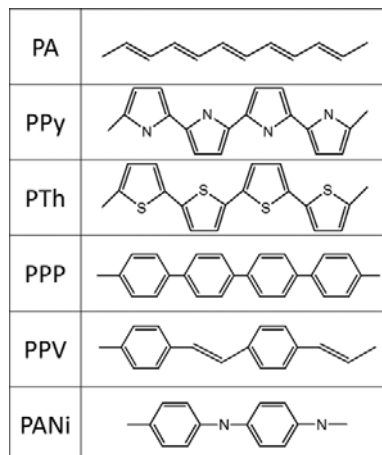
polyaniline (PANI), polypyrrole (PPy), polythiophene (PTh), poly(para-phenylene) (PPP), polyfuran (PF) และ poly(phenylene-vinylene) (PPV) เป็นต้น โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์เหล่านี้แสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 3 แสดงการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์บนสายโซ่พอลิไพโรล โดย A- คือไอออนลบ จะเห็นว่าการนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยผ่านอนุมูลอิสระที่มีประจุบวก (radical cation) หรือเรียกว่า polaron

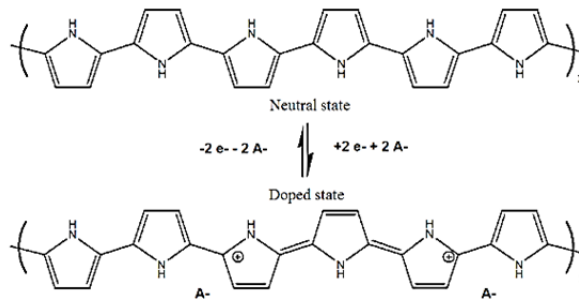
หลังจากมีการค้นพบสมบัติการนำไฟฟ้า ได้มีงานวิจัยเพื่อนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าไปใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น LEDs, electrochromic windows, energy storage sensing และ แอคชูเอเตอร์ การนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาสร้างเป็นแอคชูเอเตอร์ พบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1990 (Baughman et al., 1990) โดย Baughman และคณะ สำหรับการสร้างแอคชูเอเตอร์โดยใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นแม่แบบ เริ่มจากการขึ้นรูปพอลิเมอร์เป็นแผ่น

ฟิล์ม จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นว่ามีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก เช่น ทดสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีการกระตุ้นด้วยความต่างศักย์ค่าต่างๆ ซึ่งเรียกรูปการทดสอบนี้ว่าการเปลี่ยนแปลงงานเชิงไฟฟ้าเป็นงานเชิงกล เช่น การทดสอบการยืดหดตัวของพอลิไพโรล เมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า และพบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ เกิดเนื่องจากการแพร่ผ่านเข้า-ออกของไอออนหรือประจุผ่านสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อมีการกระตุ้นด้วยการเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 4

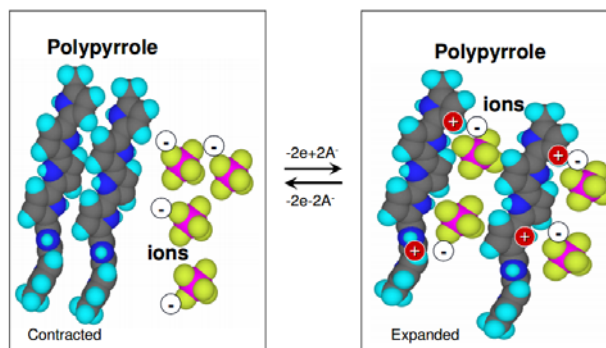
เมื่อไอออนเกิดการเหนี่ยวนำจากประจุที่แตกต่างกันจะเกิดการแพร่ของไอออน โดยเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ไอออนลบจะถูกเหนี่ยวนำด้วยประจุบวกจึงแพร่เข้าไประหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์เกิดการขยายตัวได้ และเมื่อปิดกระแสไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไอออนที่อยู่ระหว่างสายโซ่จะแพร่ออกจากสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการหดตัว (Mirfakhrai et al., 2007)



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Chiang et al., 1977)



รูปที่ 3 แสดงการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์บนสายโซ่ PPy



รูปที่ 4 แสดงการหดตัวและขยายตัวของพอลิไพโรล เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จะเกิดการเข้าแทรกของไอออนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาการศึกษาทางด้านพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเพื่อใช้สร้างแอคชูเอเตอร์มีเป้าหมายคือ ต้องการสารที่สามารถกระตุ้นได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ต่ำ แต่มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ชัดเจน สารที่ใช้ต้องมีความแข็งแรงเหมือนกล้ามเนื้อจริง นั่นคือมีค่าความเค้น และความเครียดสูง สามารถเตรียมและขึ้นรูปได้ง่าย จากนั้นได้มีการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าหลายชนิดมาทดสอบสมบัติทางแอคชูเอเตอร์ ได้แก่ PPy, PANi, PTh และ PEDOT (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสี่ชนิดนี้ จะมีความเสถียรมากกว่า PA จึงนิยมใช้ในงานวิจัยทางแอคชูเอเตอร์มากกว่า (Kaneto, 2016) ข้อดีของการเตรียมแอคชูเอเตอร์จากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเหล่านี้คือ ความเค้นและความเครียดมีค่าสูง มีการตอบสนองเร็ว

โดยใช้ความต่างศักย์ในการควบคุมต่ำ ทำการสังเคราะห์และเตรียมขึ้นรูปได้ง่าย ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

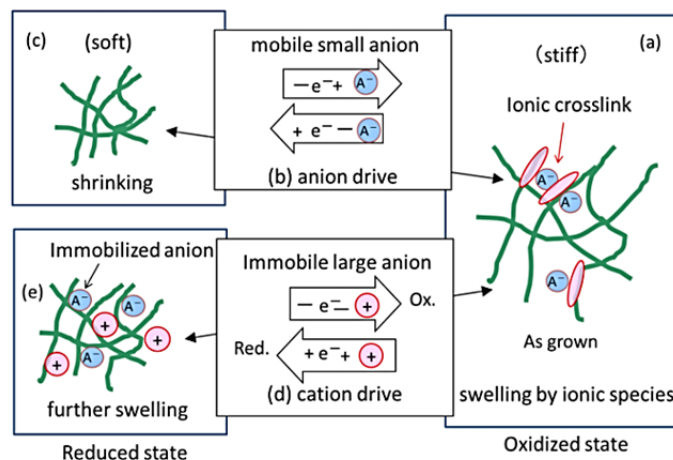
โดยพอลิเมอร์ที่ได้รับการศึกษาสมบัติทางแอคชูเอเตอร์มากที่สุดคือ PPy เนื่องจากนำไปรวมกับอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะได้ง่าย มีการนำไฟฟ้าที่ดี ค่าการนำไฟฟ้าสูง สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่มีความหนาแน่นแข็งแรง มีค่าความเครียด 39% ที่ 49 MPa

แต่อย่างไรก็ตาม PPy ไม่สามารถละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ได้ จึงเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มด้วยวิธีทางเคมีได้ยาก (Susumu et al., 2005; Tetsuji et al., 2005; Madden et al., 2007) หลังจากนั้นได้มีการศึกษา PANi โดยเตรียมจากปฏิกิริยา oxidative polymerization ของอะนิลีนใน

ตัวทำละลาย *n*-methyl-2-pyrrolidone (NMP) และ dimethyl sulfoxide (DMSO) ซึ่งสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม เส้นใย หรือรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย แต่ PANi มีข้อจำกัดคือ จะแสดงสมบัติแอกซูเอเตอร์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นกรด $\text{pH} < 4$ และมีค่าความเครียดสูงสุดเพียง 7% (Takashima et al., 2004; Takashima et al., 2009) ซึ่งถือว่ามีความน้อยมากเมื่อเทียบกับ PPy

กลไกการเกิดปฏิกิริยา electrochemo-mechanical deformation หรือพอลิเมอร์เกิดการพองตัว-หดตัวเมื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ แสดงดังรูปที่ 5 โดยปกติแล้วมอนอเมอร์จะเกิดเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า โดยผ่านปฏิกิริยา chemical oxidative polymerization ดังนั้น พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปที่ถูกออกซิไดซ์ (รูปที่ 5(a)) ซึ่งสภาวะนี้พอลิเมอร์จะเกิดการพองตัวเนื่องจากการแทรกเข้าไปในสายโซ่พอลิเมอร์ของไอออน A^- และโครงสร้างพอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงเนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางระหว่าง polarons บนสายโซ่พอลิเมอร์และไอออน A^- เกิดเป็นพันธะไอออนิก เมื่อมีการกระตุ้นด้วยค่าความต่างศักย์ที่เป็นลบ สภาวะที่ถูกออกซิไดซ์นี้จะเปลี่ยนเป็นสภาวะที่

ถูกรีดิวซ์ ดังรูปที่ 5 (c) หรือ 5 (e) โดยพอลิเมอร์ที่ถูกรีดิวซ์จะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับขนาดของไอออน A^- ที่ใช้ในการพอลิเมอไรซ์ ถ้าใช้ไอออนลบที่มีขนาดเล็ก เช่น *p*-phenol sulfonic acid (PPS) ไอออนลบนั้นจะหลุดออกมา ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหดตัวดังรูปที่ 5 (b) และ 5 (c) ตามลำดับ (Takashima et al., 2003) ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันจะทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเกิดการพองตัว - หดตัวได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่เข้า-ออกของไอออนลบโดยผ่านขั้นตอน 5(a) - 5(b) - 5(c) จึงเรียกกลไกแบบนี้ว่า “anion drive” ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ไอออนลบมีขนาดใหญ่ เช่น dodecylbenzene sulfonic acid (DBSA) ในขั้นตอนการสังเคราะห์นั้นไอออนลบจะถูกตรึงไว้ในสายโซ่พอลิเมอร์ และจะถูกรีดิวซ์โดยไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าไปในสายโซ่เพื่อทำให้ไอออนลบนั้นเป็นกลาง ทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเกิดการพองตัวขึ้นอีก ดังรูปที่ 5 (d) และ 5 (e) (Takashima et al., 2003) เนื่องจากการเคลื่อนที่เข้า-ออกของไอออนบวก โดยผ่านขั้นตอนดังรูปที่ 5(a) - 5(d) - 5(e) จึงเรียกกลไกแบบนี้ว่า “cation drive”

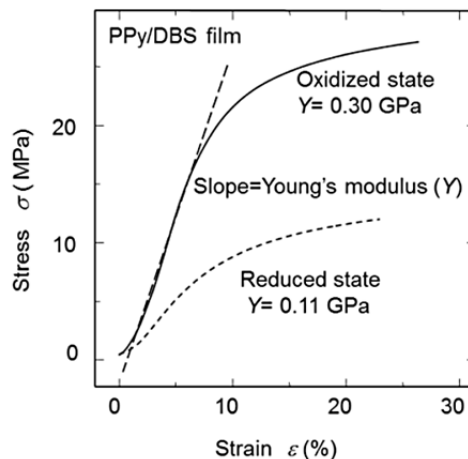


รูปที่ 5 แสดงกลไกการเกิด electrochemo-mechanical deformation ในพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

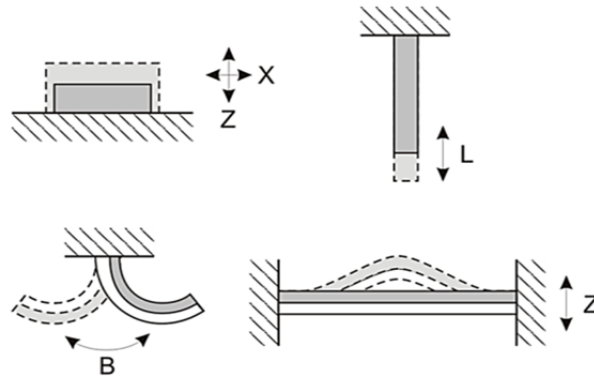
จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในสภาวะถูกออกซิไดซ์มีความแข็งแรงมากกว่าในสภาวะถูกรีดิวซ์ 2-3 เท่า ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 6 โดยพบว่าค่า Young's modulus (Y) ของแผ่นฟิล์ม PPy/DBS ที่สภาวะถูกออกซิไดซ์มีค่า 0.3 GPa และสภาวะถูกรีดิวซ์มีค่า 0.11 GPa (Asaka and Okuzaki, 2014) ซึ่งได้จากค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างค่าความเค้นแรงดึง (tensile stress) ของแผ่นฟิล์มต่อค่าความยาวของแผ่นฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไป จะพบว่าที่สภาวะถูกออกซิไดซ์แผ่นฟิล์ม PPy/DBS มีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ π -electron จากการเกิด polarons และการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะไอออนิก ในทางตรงกันข้ามที่สภาวะถูกรีดิวซ์ polarons และพันธะไอออนิกจะหายไป ทำให้แผ่นฟิล์ม PPy มีความอ่อนนุ่มมากขึ้น ดังนั้นเราสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของ

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้โดยการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา electrochemical oxidation และ electrochemical reduction

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีค่าความเค้นสูงถึง 5 MPa ซึ่งสูงกว่าค่าความเค้นของกล้ามเนื้อสิ่งมีชีวิตที่รับแรงได้สูงสุด 0.35 MPa (ตารางที่ 1) (Madden et al., 2000) ส่วนค่าความเครียดของพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีค่าประมาณ 1-10% ซึ่งต่ำกว่าค่าความเครียดของกล้ามเนื้อซึ่งมีค่าประมาณ 20% แต่อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์นำไฟฟ้า PPy/DBS สามารถขยายตัวได้มาก มีค่าความเครียด 30-40 % โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรนี้จะขึ้นกับชนิดไอออนและตัวทำละลายที่ใช้ (Smela and Gadegaard, 1999; Melling et al., 2011) ดังนั้นเราสามารถนำสมบัตินี้มาสร้างแอกชูเอเตอร์รูปแบบต่างๆ ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curves) ของแผ่นฟิล์ม PPy/DBS ที่สภาวะถูกออกซิไดซ์และสภาวะถูกรีดิวซ์ (Asaka and Okuzaki, 2014)



รูปที่ 7 แสดงภาพแอกชูเอเตอร์ PPy ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ perpendicular expansion, linear strain, bending bilayer และ buckling sheet (Baughman, 1996; Jager, 2013)

ในยุคที่อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีเฟื่องฟูมีการนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ในกระบวนการผลิตมากมายเป็นผลให้เกิดการลดลงของวัสดุจากธรรมชาติ แล้วยังปล่อยของเสียก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา วิธีการป้องกันและลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้มีหลายวิธี โดยการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติลงและนำวัสดุที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่นอกจากนี้ยังรวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุให้สูงขึ้น และลดการใช้พลังงานในการผลิตลง ซึ่งงานวิจัยในปัจจุบันต่างตระหนักถึงผลกระทบที่มีต่อสิ่งมีชีวิตและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นเดียวกัน มีการมุ่งเน้นที่จะศึกษาการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยนำวัสดุจากธรรมชาติหรือวัสดุที่ย่อยสลายได้ หรืออิเล็กทรอนิกส์ทางชีวภาพ (organic electronics) เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสารอิเล็กทรอนิกส์ทางชีวภาพนี้ยังมีข้อดี คือ ขึ้นรูปง่าย ราคาถูก ประหยัดพลังงาน น้ำหนักเบา และยังเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง สำหรับพอลิเมอร์นำไฟฟ้าซึ่งมีสมบัติทาง EAPs ได้มีการศึกษาเพื่อรวมกับพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) หลายชนิด เช่น cellulosic gel (Kunchornsap and Sirivat, 2012), silk fibroin

hydrogel (Srisawasdi et al., 2015) และ graphene/gelatin hydrogel (Tungkavet et al., 2015) เป็นต้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นแอกชูเอเตอร์ทางชีวภาพ (bio-actuator) ที่มีความแข็งแรงและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการทำงานของกล้ามเนื้อจริง

เอกสารอ้างอิง

- Asaka, K., and Okuzaki, H. (2014). Soft Actuators Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives.
- Bar-Cohen, Y. (2007). Artificial muscles based on electroactive polymers as an enabling tool in biomimetics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 221(10): 1149-1156.
- Baughman, R.H., Shacklette, L.W., Elsenbaumer, R.L., Plichta, E., and Becht, C. (1990). Conducting Polymer Electromechanical Actuators. In: Brédas JL, Chance RR, editors. Conjugated Polymeric Materials: Opportunities in Electronics, Optoelectronics, and Molecular Electronics. Dordrecht: Springer Netherlands 559-582.

- Baughman, R.H. (1996). Conducting polymer artificial muscles. *Synthetic Metals* 78(3): 339-353.
- Chiang, C.K., Fincher, C.R., Park, Y.W., Heeger, A.J., Shirakawa, H., Louis, E.J., Gau, S., and MacDiarmid, A.G. (1977). Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene. *Physical Review Letters* 39(17): 1098-1101.
- El Wahed, A.K., Sproston, J.L., and Schleyer, G.K. (2002). Electrorheological and magnetorheological fluids in blast resistant design applications. *Materials & Design* 23(4): 391-404.
- Jaffe, H. (1958). Piezoelectric Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society* 41(11): 494-498.
- Jager, E.W.H. (2013). Conducting polymer actuators for medical devices and cell mechano-transduction. 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.
- Kaneto, K. (2016). Research Trends of Soft Actuators based on Electroactive Polymers and Conducting Polymers. *Journal of Physics: Conference Series* 704(1).
- Kunchornsup, W., and Sirivat, A. (2012). Physically cross-linked cellulosic gel via 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquid and its electromechanical responses. *Sensors and Actuators A: Physical* 175: 155-164.
- Madden, J.D., Cush, R.A., Kanigan, T.S., and Hunter, I.W. (2000). Fast contracting polypyrrole actuators. *Synthetic Metals* 113(1-2): 185-192.
- Madden, J.D., Rinderknecht, D., Anquetil, P.A., and Hunter, I.W. (2007). Creep and cycle life in polypyrrole actuators. *Sensors and Actuators A: Physical* 133(1): 210-217.
- Melling, D., Wilson, S., Berggren, M., and Jager, E.W.H. (2011). Altering the structure of polypyrrole and the influence on electrodynamic performance.
- Mirfakhrai, T., Madden, J.D.W., and Baughman, R.H. (2007). Polymer artificial muscles. *Materials Today* 10(4): 30-38.
- Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., and Gibson, M.A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design* (1980-2015) 56: 1078-1113.
- Olabi, A.G., and Grunwald, A. (2008). Design and application of magnetostrictive materials. *Materials & Design* 29(2): 469-483.
- Smela, E., and Gadegaard, N. (1999). Surprising Volume Change in PPy(DBS): An Atomic Force Microscopy Study. *Advanced Materials* 11(11): 953-957.
- Srisawasdi, T., Petcharoen, K., Sirivat, A., and Jamieson, A.M. (2015). Electromechanical response of silk fibroin hydrogel and conductive polycarbazole/silk fibroin hydrogel composites as actuator material. *Materials Science and Engineering: C* 56: 1-8.
- Susumu, H., Tetsuji, Z., Wataru, T., and Keiichi, K. (2005). Free-standing gel-like polypyrrole actuators doped with bis(perfluoroalkyl-sulfonyl)imide exhibiting extremely large strain. *Smart Materials and Structures* 14(6): 1501.
- Takashima, W., Pandey, S.S., and Kaneto, K. (2003). Cyclic voltammetric and electrochemo-mechanical characteristics of freestanding polypyrrole films in diluted media. *Thin Solid Films* 438-439: 339-345.
- Takashima, W., Nakashima, M., Pandey, S.S., and Kaneto, K. (2004). Enhanced electrochemo-mechanical activity of polyaniline films towards high pH region: contribution of

- Donnan effect. *Electrochimica Acta* 49(24): 4239-4244.
- Takashima, W., Nakashima, M., Hashimoto, H., Tominaga, K., and Kaneto, K. (2009). Suppression of pH effect on the electrochemical deformation in polyaniline film. *Thin Solid Films* 518(2): 674-677.
- Tetsuji, Z., Susumu, H., Wataru, T., and Keiichi, K. (2005). Comparison of Conducting Polymer Actuators Based on Polypyrrole Doped with BF_4^- , PF_6^- , CF_3SO_3^- , and ClO_4^- . *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 78(3): 506-511.
- Tungkavet, T., Seetapan, N., Pattavarakorn, D., and Sirivat, A. (2015). Graphene/gelatin hydrogel composites with high storage modulus sensitivity for using as electroactive actuator: Effects of surface area and electric field strength. *Polymer* 70: 242-251.

