

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์นำไฟฟ้าของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นแผ่นแปะยาที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยด้วยไฟฟ้า โดยการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนด้วยวิธี Chemical oxidative polymerization และนำพอลิไทโอฟีนที่สังเคราะห์ได้ไปโคปด้วยยาคัดแบบที่มีฤทธิ์เป็นกรด ได้แก่ กรดซาลิไซลิก จากนั้นนำพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปแล้วไปผสมกับอะคริลาไมด์มอนอเมอร์และขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าด้วยวิธีการหล่อ จากนั้นศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปแล้ว (SA-doped PTh) ปริมาณของสารเชื่อมขวาง และความแรงกระแสไฟฟ้าต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางไฟฟ้ากล และความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้า และพบว่าผลการทดลองเป็นดังนี้

#### 4.1 พอลิไทโอฟีน (Polythiophene, PTh) และพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิก (SA-doped PTh)

##### 4.1.1 ลักษณะทั่วไป

พอลิไทโอฟีนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Chemical oxidative polymerization ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ซึ่งใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวออกซิไดซ์ภายใต้การควบคุมสภาวะของการสังเคราะห์ ได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิในการสังเคราะห์ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยมีการกวนสารผสมอยู่ตลอดระยะเวลา 9 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นทำการหยุดปฏิกิริยาโดยใช้เมทานอล กรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น แล้วนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้สุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยพอลิไทโอฟีนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะดังรูป 4.1 ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม เกาะกันเป็นกลุ่มเล็กน้อยและมีลักษณะฟูเล็กน้อย เมื่อสัมผัสกับพื้นผิวที่เป็นแม่เหล็ก อนุภาคขนาดเล็กของพอลิไทโอฟีนจะเกาะติดบริเวณพื้นผิวของแม่เหล็กนั้น



รูป 4.1 พอลิฟีนอลที่สังเคราะห์ได้

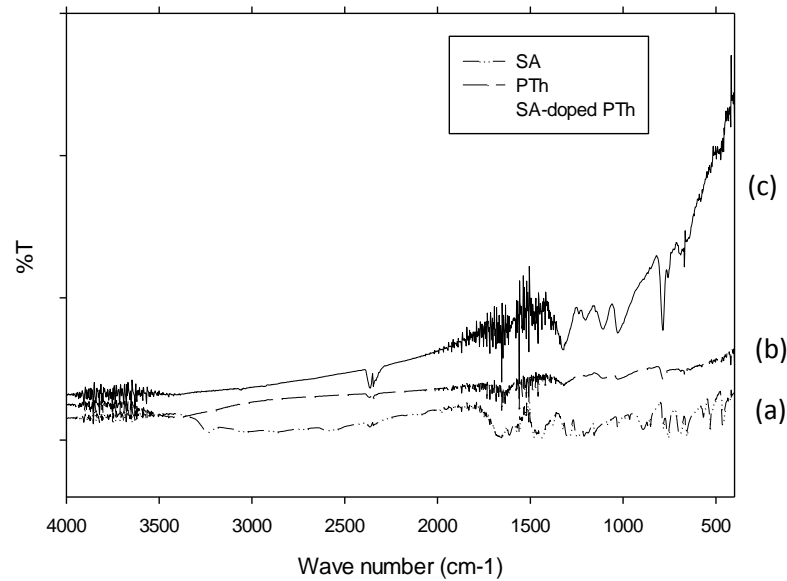
สำหรับการโคปพอลิฟีนอลด้วยกรดซาลิไซลิก ได้ทำการแช่ผงพอลิฟีนอลในสารละลายกรดซาลิไซลิกความเข้มข้น 0.0119 M ทำการกวนตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองและนำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้สุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะพอลิฟีนอลที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกแล้วมีลักษณะดังรูป 4.2 โดยพบว่าพอลิฟีนอลที่ผ่านการโคปแล้วมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลแกมม่วงเข้ม มีขนาดอนุภาคเล็กลง ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และมีลักษณะฟูเล็กน้อย ฟุ้งติดภาชนะที่จัดเก็บ



รูป 4.2 พอลิฟีนอลที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิก

#### 4.1.2 สมบัติทางเคมี

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิฟีนอลที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี พบว่าความยาวคลื่นช่วงการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของกรดซาลิไซลิก, พอลิฟีนอล และพอลิฟีนอลที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกแสดงดังรูป 4.3, ตาราง 4.1 และตาราง 4.2



รูป 4.3 FTIR สเปกตรัมของ (a) กรดซาลิไซลิก, (b) พอลิทีโอฟิน และ (c) พอลิทีโอฟินที่ผ่านการโด๊ปด้วยกรดซาลิไซลิก

ตาราง 4.1 ช่วงการดูดกลืนแสงของกรดซาลิไซลิก

ความยาวคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	การเปลี่ยนแปลง
1301	C-O stretching vibration
1654	C=O stretching vibration
2363	O-H stretching vibration

จากรูป 4.3 และตาราง 4.1 พบว่าสเปกตรัมช่วงอินฟราเรดของกรดซาลิไซลิกเกิดพีค (Peak) การดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching vibration ในช่วง 1301 cm<sup>-1</sup>, C=O stretching vibration ในช่วง 1654 cm<sup>-1</sup> และ O-H stretching vibration ในช่วง 2365 cm<sup>-1</sup> [31]

ตาราง 4.2 ช่วงการดูดกลืนแสงของพอลิทีโอฟิน

ความยาวคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	การเปลี่ยนแปลง
783	C-S bending vibration
1200	C-C stretching vibration ของ $\alpha$ -coupled ของพอลิทีโอฟิน
1317	C-H stretching vibration
1653	C=C stretching vibration ของวงแหวนทีโอฟิน

จากรูป 4.3 และตาราง 4.2 พบว่าสเปกตรัมช่วงอินฟราเรดของพอลิทีโอพีนเกิดพีการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน C-S bending vibration ในช่วง  $783\text{ cm}^{-1}$ , C-C stretching vibration ของ  $\alpha$ -coupled ของพอลิทีโอพีนในช่วง  $1200\text{ cm}^{-1}$ , C-H stretching vibration ในช่วง  $1317\text{ cm}^{-1}$  และ C=C stretching vibration ของวงแหวนทีโอพีนในช่วง  $1653\text{ cm}^{-1}$  [32]

สำหรับสเปกตรัมช่วงอินฟราเรดของพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิก พบว่าพีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่  $783\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอาจเป็น C-S bending vibration ในสายโซ่พอลิทีโอพีนอาจเกิดการงอของพันธะ (Bending) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะของ C-S bending vibration [33] และพบพีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสเปกตรัมที่  $1563\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C=O stretching vibration ของหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นส่วนประกอบของกรดซาลิไซลิก และนอกจากจะพบพีการ C=O แล้ว ยังพบพีการของ C-O stretching vibration ที่ความยาวคลื่น  $1195$ ,  $1233$ , และ  $1326\text{ cm}^{-1}$  และพีการของ O-H stretching vibration ที่  $2365\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งยืนยันได้ว่าพบหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลของกรดซาลิไซลิกบนสายโซ่พอลิทีโอพีน

#### 4.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของพอลิทีโอพีน และ พอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกด้วยอุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ Two point probe โดยในการทดสอบจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง Linear ohmic regime แก่ชิ้นทดสอบ และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าระหว่าง Probe ทั้งสองของอุปกรณ์ จากนั้นคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบจากสมการ (2.2) โดยค่าคงที่ของอุปกรณ์ (K) เท่ากับ  $5.373 \times 10^{-3}$  พบว่า พอลิทีโอพีนและพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกมีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ  $5.612$  และ  $0.326\text{ S/cm}$  ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าของพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง อาจเป็นผลจากในระหว่างกระบวนการโคป สายโซ่พอลิเมอร์อาจเกิดการแตกตัวทำให้สายโซ่สั้นลง เนื่องจากมีการกวนสารตลอดระยะเวลาการโคป

## 4.2 พอลิเมอร์ไฮโดรเจล (Polyacrylamide hydrogel, PAAM hydrogel)

### 4.2.1 ลักษณะทั่วไป

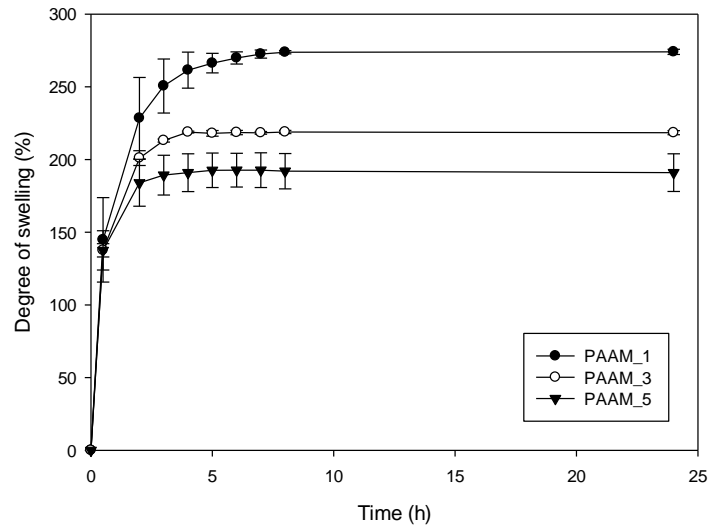
งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลด้วยวิธีการหล่อ (Casting) ที่อุณหภูมิห้อง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารเชื่อมขวาง  $N,N'$ -MBA ที่ใช้ในการขึ้นรูป เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า ฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีลักษณะเรียบใส ดังรูป 4.4 และเมื่อสัมผัสด้วยมือพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลมีความเหนียวหนืดติดมือ อีกทั้งยังพบว่าเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีความเปราะมากขึ้น



รูป 4.4 ลักษณะฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล

### 4.2.2 ระดับการบวมตัว (Degree of swelling)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการบวมตัวหรือระดับการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล ในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตท (Acetate buffer solution) ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ณ อุณหภูมิ  $37.0 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง  $N,N'$ -MBA ต่อความสามารถในการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.5



รูป 4.5 ระดับการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลที่ปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

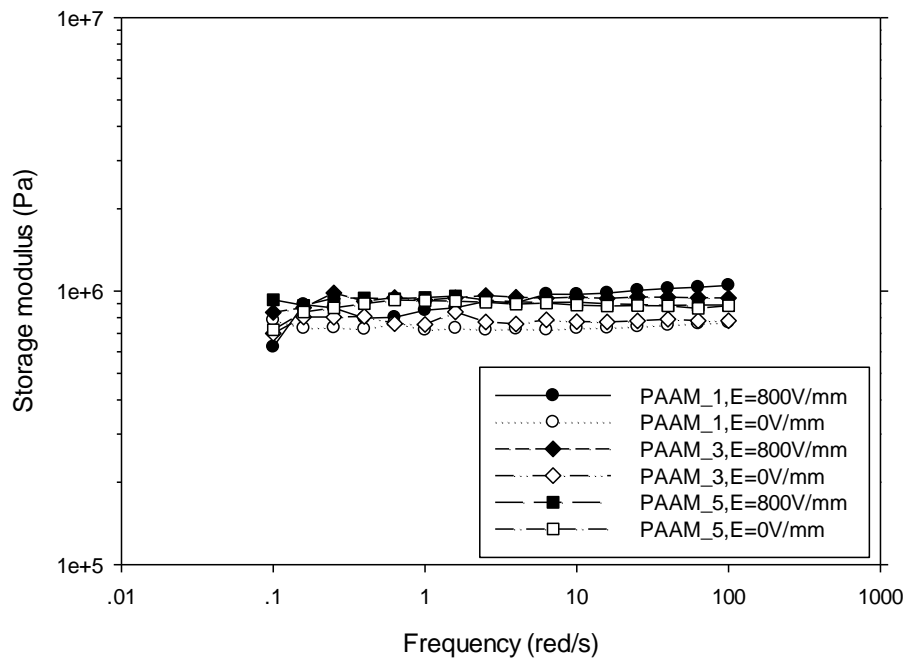
จากรูป 4.5 พบว่าความสามารถในการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเนื่องจากความแตกต่างของค่า Ionic chemical potential ระหว่างภายในและภายนอกฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลค่อนข้างสูง จึงทำให้สารละลายบัฟเฟอร์อะซีเตตสามารถแพร่เข้าสู่ภายในฟิล์ม ได้ดี จากนั้นระดับการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง โดยพบว่าระดับการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติมปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีช่องว่างภายในโมเลกุลขนาดเล็กลง และยังส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเกิดความแข็งเกร็ง (Rigid) เพิ่มขึ้น จึงสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นและเกิดการขยายตัวได้น้อยลงจึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีระดับการบวมตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลที่เติมปริมาณสารเชื่อมขวางต่ำๆ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นระดับการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น ดังสรุปในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ระดับการบวมตัวสูงสุดและระยะเวลาสมดุลการบวมตัวของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล

ขั้นทดสอบ	ระดับการบวมตัวสูงสุด (%)	ระยะเวลาสมดุล (ชั่วโมง)
PAAM_1	273.806 ± 1.103	8
PAAM_3	218.925 ± 1.074	8
PAAM_5	192.686 ± 11.962	7

#### 4.2.3 สมบัติเชิงไฟฟ้ากล (Electromechanical properties)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้ากลของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล โดยทดสอบสมบัติกระแสวิทยาทายใต้กระแสไฟฟ้า (Electrorheological properties) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และกำหนดให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้นทดสอบเท่ากับ 0.1-100 รอบต่อวินาที เปอร์เซ็นต์ความเครียด เท่ากับ 0.5 และอุณหภูมิการทดสอบ เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และทำการปรับเปลี่ยนความแรงกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 0 และ 800 โวลต์ต่อมิลลิเมตร (V/mm) โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางต่อสมบัติกระแสวิทยาของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.6 โดยค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) เป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติความเป็นของแข็งยืดหยุ่นของวัสดุ



รูป 4.6 กระแสวิทยาของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลที่ปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ภายใต้กระแสไฟฟ้า 0 และ 800 V/mm

จากรูป 4.6 พบว่าในสถานะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้ากระตุ้น ฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ภายในฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการยึดเหนี่ยวกันมากขึ้นและสามารถต้านทานการไหลที่เกิดจากแรงเฉือนได้มากขึ้น สำหรับสถานะภายใต้กระแสกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 800 V/mm พบว่าฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายในสายโซ่ของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีโมเลกุลของน้ำ

หรือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เป็นส่วนประกอบภายในสายโซ่ ดังนั้นเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีกระแสไฟฟ้ากระตุ้น โมเลกุลของอะคริลาไมด์จึงเกิดการโพลาไรซ์แบบไอออนิก (Ionic polarization) ขึ้น จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของอะคริลาไมด์ได้มากขึ้นและส่งผลให้สมบัติเชิงไฟฟ้ากลดีขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus response,  $\Delta G'$ ) และความไวในการตอบสนอง (Sensitivity,  $\Delta G'/G'_0$ ) ของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล ณ ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรอ์เซ็นต์ความเครียด (% Stain) เท่ากับ 0.03 ภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 800 V/mm โดยคำนวณจากสมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 การตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสมและความไวในการตอบสนองของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล

ชั้นทดสอบ	การตอบสนองของมอดูลัสสะสม (Storage modulus response, $\Delta G'$ )	ความไวในการตอบสนอง (Sensitivity, $\Delta G'/G'_0$ )
PAAM_1	$2.82 \times 10^5 \pm 1.99 \times 10^5$	$3.68 \times 10^{-1} \pm 3.42 \times 10^5$
PAAM_3	$1.64 \times 10^5 \pm 1.15 \times 10^5$	$2.10 \times 10^{-1} \pm 4.35 \times 10^5$
PAAM_5	$3.78 \times 10^3 \pm 2.67 \times 10^3$	$4.27 \times 10^{-3} \pm 6.22 \times 10^5$

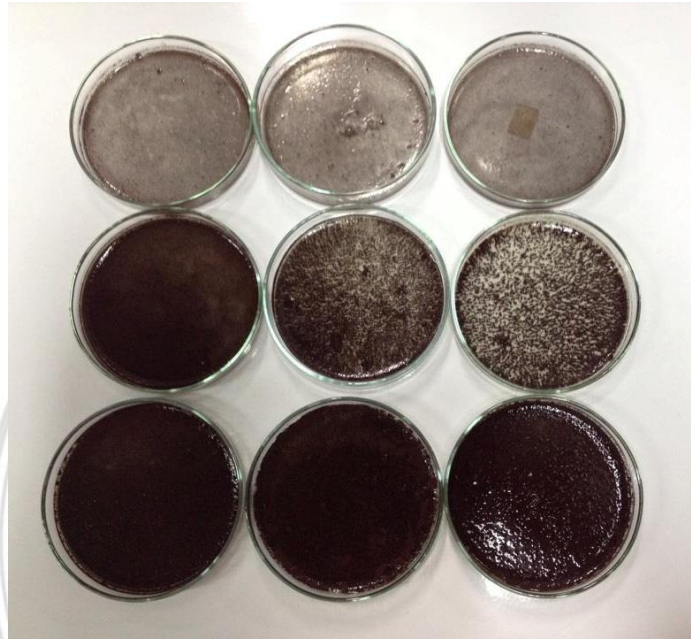
จากตาราง 4.4 พบว่าฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลที่เติมสารเชื่อมขวาง 1 เปรอ์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าการตอบสนองของมอดูลัสสะสม ( $\Delta G'$ ) และความไวในการตอบสนอง ( $\Delta G'/G'_0$ ) สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ  $2.82 \times 10^5 \pm 1.99 \times 10^5$  ปาสคัล และ  $3.68 \times 10^{-1} \pm 3.42 \times 10^5$  ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิอะคริลาไมด์เกิดขึ้นน้อย ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากกว่า นอกจากนี้ยังสามารถถูกโพลาไรซ์ภายใต้กระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าจึงส่งผลให้สามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าได้ไวกว่าฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางมาก [6]

#### 4.3 ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ (Polythiophene/Polyacrylamide hydrogel, PTh/PAAM hydrogel)

##### 4.3.1 ลักษณะทั่วไปของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์

งานวิจัยนี้ได้ทำการโคปพอลิไทโอฟีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยยาคันแบบที่มีฤทธิ์เป็นกรด ได้แก่ กรดซาลิไซลิก จากนั้นนำพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปแล้วไปผสมกับอะคริลาไมด์มอนอเมอร์และขึ้น

รูปเป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าด้วยวิธีการหล่อ โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิทีโอพินที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิก (SA-doped PTh) และปริมาณของสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลักษณะทั่วไปของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าแสดงดังรูป 4.7



รูป 4.7 ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอพิน/พอลิอะคริลาไมด์ ที่มีปริมาณพอลิทีโอพิน และปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

จากรูป 4.7 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอพิน/พอลิอะคริลาไมด์ มีผิวเรียบ มีสีน้ำตาลแกมม่วงเข้ม โดยฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีสีเข้มมากขึ้นเมื่อปริมาณพอลิทีโอพินที่ผ่านการโคปด้วยกรดซาลิไซลิกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการสัมผัสด้วยมือยังพบว่า การเพิ่มของปริมาณพอลิทีโอพินที่ผ่านการโคปแล้วมีผลทำให้ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีความเปราะลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่ำๆ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางมากขึ้น จะมีผลทำให้ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีความเปราะเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่เติมพอลิทีโอพินที่ผ่านการโคป 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมสารเชื่อมขวาง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (PTh\_5/PAAM\_5) มีความเปราะมากที่สุด

### 4.3.2 ค่าการนำไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ โดยใช้อุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ Two point probe โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง Linear ohmic regime แก่ชั้นทดสอบแล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าระหว่าง Probe ทั้งสองของอุปกรณ์ จากนั้นคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบจากสมการ (2.2) โดยใช้ค่าคงที่ของอุปกรณ์ (K) เท่ากับ  $5.3734 \times 10^{-3}$  ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 4.5

ตาราง 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์

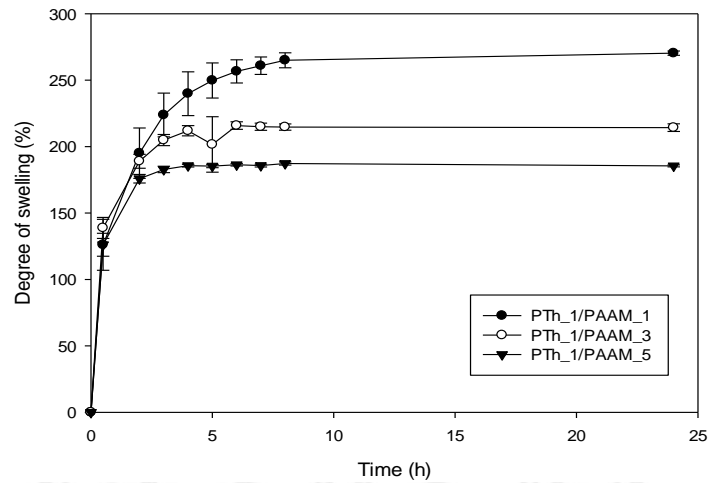
ชั้นทดสอบ	ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity, $\sigma$ (S/cm))
PTh_1/PAAM_1	$0.517 \pm 0.109$
PTh_1/PAAM_3	$0.624 \pm 0.040$
PTh_1/PAAM_5	$0.441 \pm 0.044$
PTh_3/PAAM_1	$0.547 \pm 0.038$
PTh_3/PAAM_3	$0.678 \pm 0.046$
PTh_3/PAAM_5	$0.592 \pm 0.033$
PTh_5/PAAM_1	$0.625 \pm 0.059$
PTh_5/PAAM_3	$0.582 \pm 0.020$
PTh_5/PAAM_5	$0.588 \pm 0.067$

จากตาราง 4.5 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์อยู่ในช่วง 0.4-0.6 S/cm และพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโดป ซึ่งอาจเป็นผลจากภายในฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีส่วนประกอบของน้ำหรือโมเลกุลที่มีขั้วจึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

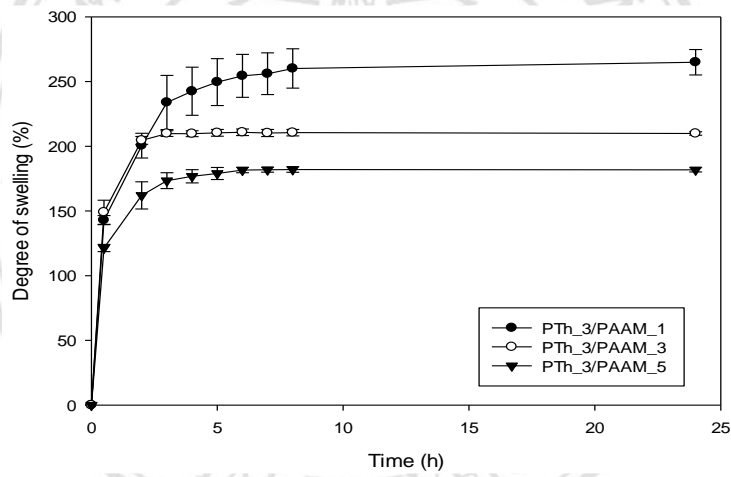
### 4.3.3 ระดับการบวมตัว (Degree of swelling)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตท (Acetate buffer solution) ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.5 ณ อุณหภูมิ  $37 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโดปและปริมาณสารเชื่อมขวางต่อระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้า ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.8 และตาราง 4.6

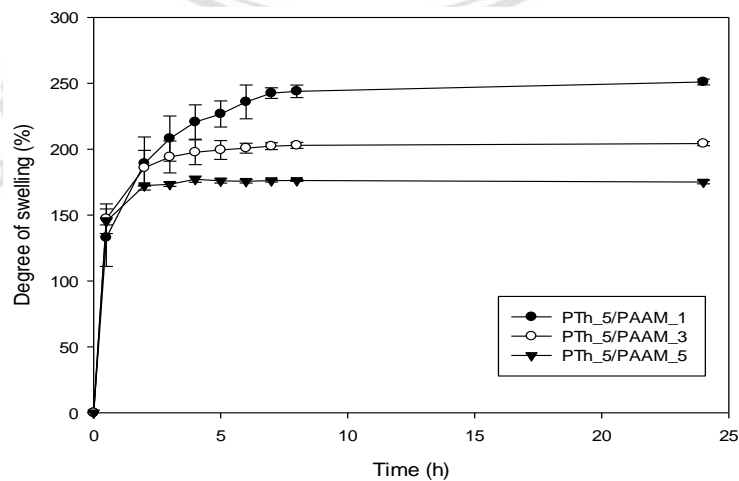
(ก)



(ข)



(ค)



รูป 4.8 ระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่เติมปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคป เท่ากับ (ก) 1, (ข) 3, และ (ค) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตาราง 4.6 ระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล  
ณ เวลา 6 ชั่วโมง

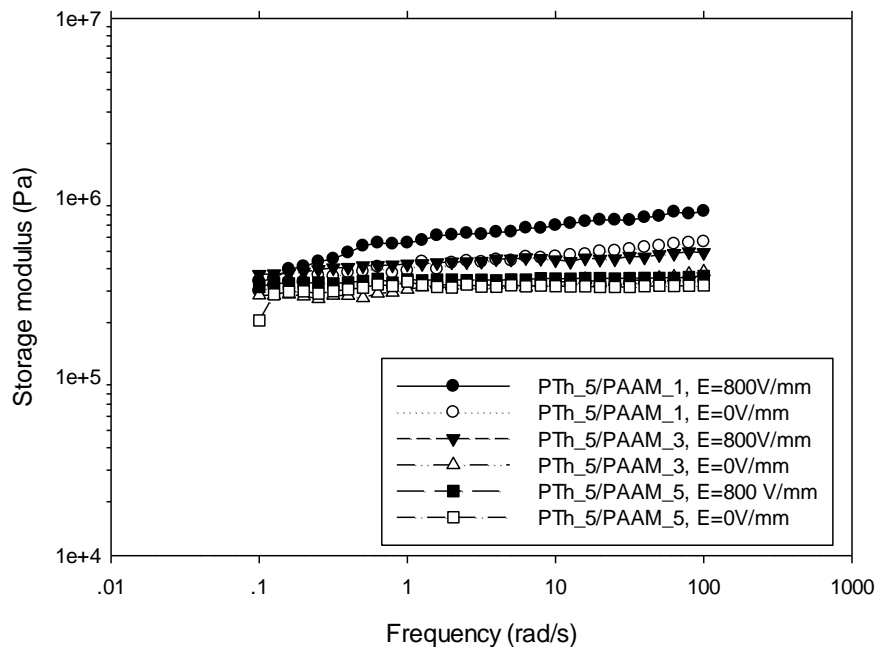
ชั้นทดสอบ	ระดับการบวมตัว (%)
PTh_1/PAAM_1	256.61 ± 8.68
PTh_3/PAAM_1	254.37 ± 16.58
PTh_5/PAAM_1	235.89 ± 12.85
PTh_1/PAAM_3	215.79 ± 2.83
PTh_3/PAAM_3	210.82 ± 2.55
PTh_5/PAAM_3	200.76 ± 3.80
PTh_1/PAAM_5	186.29 ± 0.88
PTh_3/PAAM_5	181.62 ± 2.04
PTh_5/PAAM_5	175.65 ± 1.37

จากรูป 4.8 และตาราง 4.6 พบว่าระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากความแตกต่างของค่า Ionic chemical potential ระหว่างภายในและภายนอกฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลค่อนข้างสูง จึงทำให้สารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตทสามารถแพร่เข้าสู่ภายในฟิล์มได้ดี จากนั้นระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง โดยพบว่าระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคพอลิทีโอฟินเกิดการกระจายตัวแทรกอยู่ในโครงไฮโดรเจล หรือช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิอะคริลาไมด์ นอกจากนี้ยังพบว่าระดับการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากการเติมปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีช่องว่างภายในโมเลกุลขนาดเล็กลงและยังส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเกิดความแข็งเกร็ง (Rigid) เพิ่มขึ้น จึงสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นและเกิดการขยายตัวได้น้อยลงจึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลมีระดับการบวมตัวลดลง

#### 4.3.4 สมบัติเชิงไฟฟ้ากล (Electromechanical properties)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้ากลของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ โดยทดสอบสมบัติกระแสวิทยาทนภายใต้กระแสไฟฟ้า (Electrorheological properties) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และกำหนดแรงเฉือนกับขึ้นทดสอบเท่ากับ 0.1-100 รอบต่อวินาที เปรอร์เซ็นต์ความเครียดเท่ากับ 0.5 และอุณหภูมิการทดสอบ เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และทำการปรับเปลี่ยนความแรงกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 0 และ 800 โวลต์ต่อมิลลิเมตร (V/mm) โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางและปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปต่อสมบัติกระแสวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ ผลการทดสอบเป็นดังนี้

การศึกษาคอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางต่อสมบัติกระแสวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ ได้ทำการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปเท่ากับ 5 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนปริมาณสารเชื่อมขวางเท่ากับ 1, 3 และ 5 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาสมบัติกระแสวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าและภายใต้กระแสไฟฟ้าความแรง 800 V/mm ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.9



รูป 4.9 กระแสวิทยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปเท่ากับ 5 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ภายใต้กระแสไฟฟ้า 0 และ 800 V/mm

จากรูป 4.9 พบว่าที่สภาวะภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 800 V/mm พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์มีค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์จัดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าได้ (Dielectric electroactive polymer) ซึ่งเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีกระแสไฟฟ้าจะสามารถถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงของไดโพลโมเมนต์ขึ้น ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ขึ้น [34] จึงส่งผลให้สมบัติเชิงไฟฟ้ากลดีขึ้น ค่ามอดูลัสสะสมจึงเพิ่มขึ้น และยังพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์มีค่ามอดูลัสสะสมลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ทั้งในสภาวะไม่มีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าและภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 800 V/mm เนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์เกิดขึ้นน้อย ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากกว่า จึงสามารถถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงของไดโพลโมเมนต์ได้ง่ายกว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณการเชื่อมขวางมาก จึงส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายไฟฟ้าขึ้น (Electrical network) ได้ง่ายกว่า

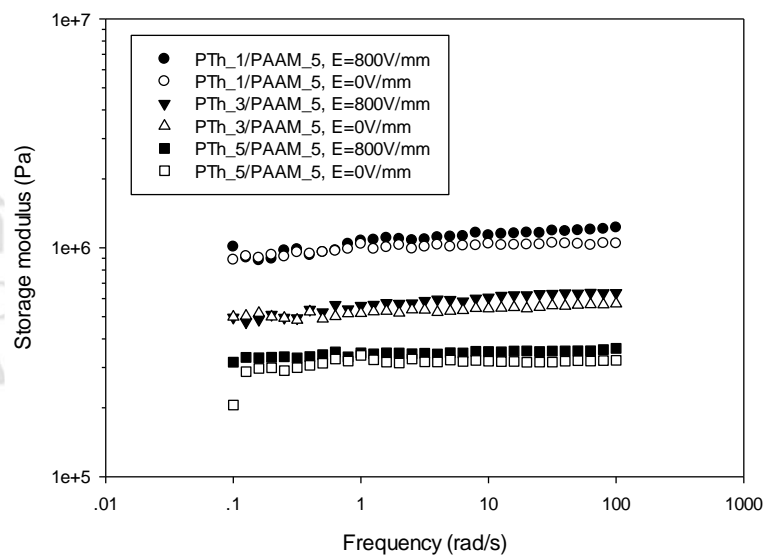
นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus response,  $\Delta G'$ ) และความว่องไวในการตอบสนอง (Sensitivity,  $\Delta G'/G'_0$ ) ของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์ ณ ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเปอร์เซ็นต์ความเครียด (% Stain) เท่ากับ 0.03 ภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 800 V/mm โดยคำนวณจากสมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 4.7

ตาราง 4.7 การตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสมและความว่องไวในการตอบสนองของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

ชั้นทดสอบ	การตอบสนองของมอดูลัสสะสม (Storage modulus response, $\Delta G'$ )	ความว่องไวในการตอบสนอง (Sensitivity, $\Delta G'/G'_0$ )
PTh_5/PAAM_1	$2.72 \times 10^5 \pm 1.92 \times 10^5$	$4.82 \times 10^{-1} \pm 2.07 \times 10^5$
PTh_5/PAAM_3	$1.09 \times 10^5 \pm 7.68 \times 10^4$	$2.83 \times 10^{-1} \pm 1.94 \times 10^5$
PTh_5/PAAM_5	$4.13 \times 10^4 \pm 2.92 \times 10^4$	$1.28 \times 10^{-1} \pm 1.98 \times 10^5$

จากตาราง 4.7 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าการตอบสนองของมอดูลัสสะสม ( $\Delta G'$ ) ภายใต้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจเนื่องจากฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่ำสามารถถูกโพลาริซ์ภายใต้กระแสไฟฟ้าได้ดีกว่า เนื่องจากที่ ปริมาณสารเชื่อมขวางต่ำฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์มีความยืดหยุ่น มากกว่า จึงง่ายต่อการถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงของไดโพลโมเมนต์ ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูด ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายไฟฟ้าขึ้น (Electrical network) ได้ง่ายกว่า จึงส่งผลให้ ค่าการตอบสนองของมอดูลัสสะสม ( $\Delta G'$ ) ภายใต้กระแสไฟฟ้าสูง และพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้า พอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ มีค่าความว่องไวในการตอบสนอง ( $\Delta G'/G'$ ) ใกล้เคียงกัน

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปโตสมบัติกระแสไฟฟ้าของ ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ ได้ทำการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่เติม ปริมาณสารเชื่อมขวางเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนปริมาณพอลิไทโอฟีน เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วทำการศึกษาสมบัติกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่ไม่มี กระแสไฟฟ้า และภายใต้กระแสไฟฟ้าความแรง 800 V/mm ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.10



รูป 4.10 กระแสไฟฟ้าของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณ สารเชื่อมขวางเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณพอลิไทโอฟีนต่างๆ ภายใต้กระแสไฟฟ้า 0 และ 800 V/mm

จากรูป 4.10 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ในสถานะที่ไม่มี การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์มีค่ามอดูลัส สะสมลดลง เมื่อปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการ โด๊ปเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมปริมาณอนุภาค พอลิไทโอฟีนในปริมาณมากนั้นฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์จึงไม่สามารถ เกิดการโพลาริซั้ได้ทั้งหมด ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำกว่า แต่เมื่ออยู่ภายใต้กระแสไฟฟ้า 800 V/mm กลับพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์มีค่ามอดูลัสสะสม เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการ โด๊ปเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใต้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นนอกจาก ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ จะเกิดการโพลาริซั้แบบไอออนิก (Ionic polarization) แล้ว ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ายังมีการเติมอนุภาคพอลิไทโอฟีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ลงไปภายในไฮโดรเจล จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าได้ (Dielectric electroactive polymer) ซึ่งเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีกระแสไฟฟ้าจะสามารถถูกโพลาริซั้แบบ Electronic polarization โดยจะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสายโซ่ ทำให้เกิดแรงดึงดูด ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สูงขึ้น [34] จึงส่งผลให้สมบัติเชิงไฟฟ้ากลดีขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus response,  $\Delta G'$ ) และความว่องไวในการตอบสนอง (Sensitivity,  $\Delta G'/G'_0$ ) ของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/ พอลิอะคริลาไมด์ ณ ความถี่ 1.0 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความเครียด (% Stain) เท่ากับ 0.03 ภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 800 V/mm โดยคำนวณจากสมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตาราง 4.8

ตาราง 4.8 การตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสมและความว่องไวในการตอบสนองของฟิล์มไฮโดรเจล- นำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการ โด๊ปต่างๆ

ชั้นทดสอบ	การตอบสนองของมอดูลัสสะสม (Storage modulus response, $\Delta G'$ )	ความว่องไวในการตอบสนอง (Sensitivity, $\Delta G'/G'_0$ )
PTh_1/PAAM_5	$1.82 \times 10^5 \pm 1.28 \times 10^5$	$1.75 \times 10^{-1} \pm 6.08 \times 10^5$
PTh_3/PAAM_5	$6.55 \times 10^4 \pm 4.63 \times 10^4$	$1.15 \times 10^{-1} \pm 3.56 \times 10^5$
PTh_5/PAAM_5	$4.13 \times 10^4 \pm 2.92 \times 10^4$	$1.28 \times 10^{-1} \pm 1.98 \times 10^5$

จากตาราง 4.8 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคป เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีการตอบสนองของมอดูลัสสะสม ( $\Delta G'$ ) ภายใต้กระแสไฟฟ้าสูงสุด อาจเนื่องจากฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปต่ำสามารถเกิดการโพลาริซซ์ได้ทั้งหมด จึงทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์สูงส่งผลให้มีค่าการตอบสนองของมอดูลัสสะสมมีค่าสูงกว่า และพบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปต่างๆ มีค่าความว่องไวในการตอบสนอง ( $\Delta G'/G'_0$ ) ใกล้เคียงกัน

#### 4.3.5 ความสามารถในการบรรจุยา (%Drug loading)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบความสามารถในการบรรจุยาของพอลิไทโอฟีนที่สังเคราะห์ได้ โดยนำกรดซาลิไซลิกที่ใช้เป็นยาต้นแบบไปโคปบนสายโซ่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน ซึ่งโปรตอนจากการแตกตัวของโมเลกุลยาจะดึงอิเล็กตรอนจากสายโซ่พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเกิดการขาดอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดประจุบวกหรือโฮล (Hole) บนสายโซ่โมเลกุล ส่วนโมเลกุลที่เป็นประจุลบที่เกิดจากการแตกตัวของยาจะเคลื่อนที่มายู่ใกล้ประจุบวกบนสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในลักษณะของ Counter ion โดยโมเลกุลที่เป็นประจุลบของยาจะมีฤทธิ์ในการรักษาโรคตามชนิดของยา ในการทดสอบได้ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดซาลิไซลิกที่สามารถโคปติดบนสายโซ่พอลิไทโอฟีนด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Visible spectroscopy, UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 296 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณความสามารถในการบรรจุยา ดังสมการ (3.5) จากการทดลองพบว่าความสามารถในการบรรจุยาโดยเฉลี่ยของพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปมีค่าเท่ากับ 29.16 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.047 มิลลิกรัม และความเข้มข้นของยาที่บรรจุภายในฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่แท้จริง ดังสมการ (3.6) แสดงดังตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ความเข้มข้นของยาที่บรรจุภายในฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่แท้จริง  
(Actual amount of drug loaded)

PTh content (%wt)	Actual amount of drug loaded (mg)
1	$1.64 \times 10^{-4}$
3	$4.95 \times 10^{-4}$
5	$8.18 \times 10^{-4}$

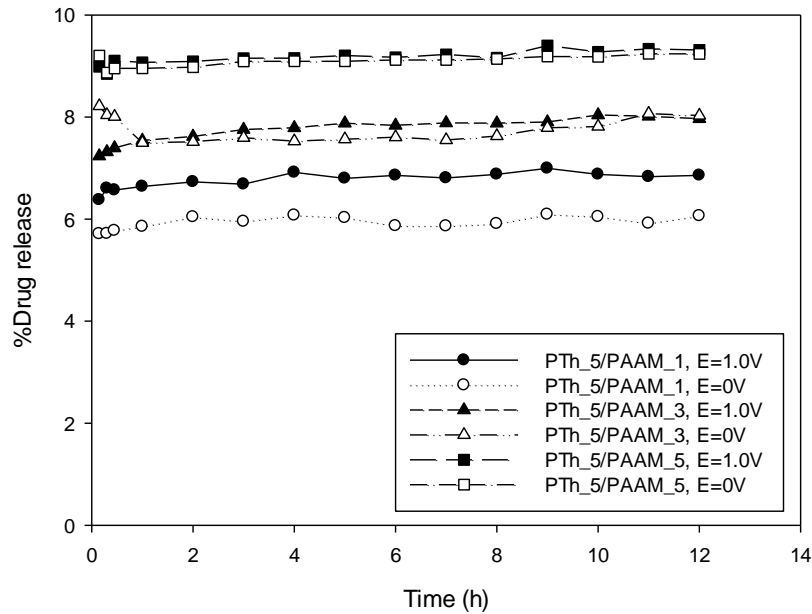
#### 4.3.6 ความสามารถในการปลดปล่อยยา (%Drug release)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอพีน/พอลิอะคริลาไมด์ ภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางและปริมาณพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคป โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารเชื่อมขวาง N,N'-MBA เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาณพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคป (SA-doped PTh) เท่ากับ 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก ในการทดสอบได้ศึกษาการแพร่ของยาต้นแบบในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตท โดยนำฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่บรรจุยาว่างบนสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตทที่จำลองให้เป็นผิวหนังและพลาสมาในร่างกายมนุษย์ ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นกรดซาลิไซลิกในสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตททุกๆ 15 นาที ในช่วงชั่วโมงแรก และทุกๆ 1 ชั่วโมงถัดไป เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดซาลิไซลิก ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี ที่ความยาวคลื่น 296 นาโนเมตร และคำนวณความสามารถในการปลดปล่อยยา (%Drug release) ดังสมการ (3.7) ผลการทดสอบเป็นดังนี้

#### อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง

ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางต่อความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอพีน/พอลิอะคริลาไมด์ ได้ทำการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคป เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนปริมาณสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าทั้งภายใต้สภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าและภายใต้กระแสไฟฟ้าความแรง 1 โวลต์ ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.11

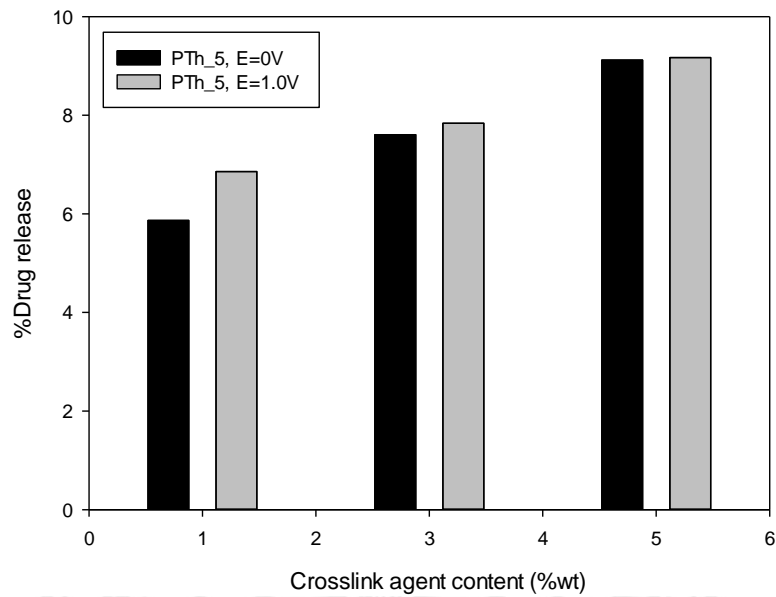
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูป 4.11 ความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์ ที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

จากรูป 4.11 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ มีอัตราการปลดปล่อยยาค่อนข้างสูงในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีอัตราการบวมสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบระดับการบวมตัว ซึ่งโครงสร้างไฮโดรเจลนำไฟฟ้าเกิดการขยายตัวและทำให้ช่องว่างในโครงสร้างไฮโดรเจลมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกระหว่างภายในฟิล์มไฮโดรเจลและสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตทภายนอกค่อนข้างสูง ส่งผลให้กรดซัลฟิวริกสามารถแพร่ออกจากฟิล์มไฮโดรเจลสู่สารละลายภายนอกได้มากในช่วงแรก และพบว่าภายใต้สภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางมาก ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นโพรงขึ้นในไฮโดรเจล ทำให้สามารถกักเก็บพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปด้วยโมเลกุลของยาไว้ภายในฟิล์มไฮโดรเจลได้ดีกว่า จึงทำให้มีปริมาณยาเริ่มต้นที่สามารถถูกปลดปล่อยออกมามากกว่า

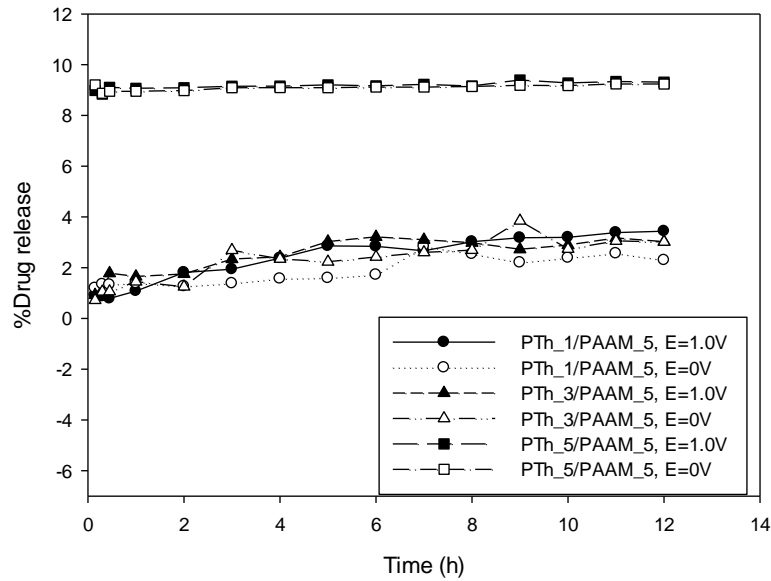
รูป 4.12 แสดงเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ทั้งในสภาวะที่ไม่มีกระแสกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าและสภาวะที่กระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 1 โวลต์ ซึ่งพบว่าภายใต้กระแสไฟฟ้าความแรง 1 โวลต์ ที่เวลา 6 ชั่วโมง ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้นภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า โดยฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้น 6.856, 7.835 และ 9.168 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูป 4.12 ความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่ปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ภายใต้ศักย์ไฟฟ้า 0 และ 1 V ที่เวลา 6 ชั่วโมง

#### อิทธิพลของปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคป

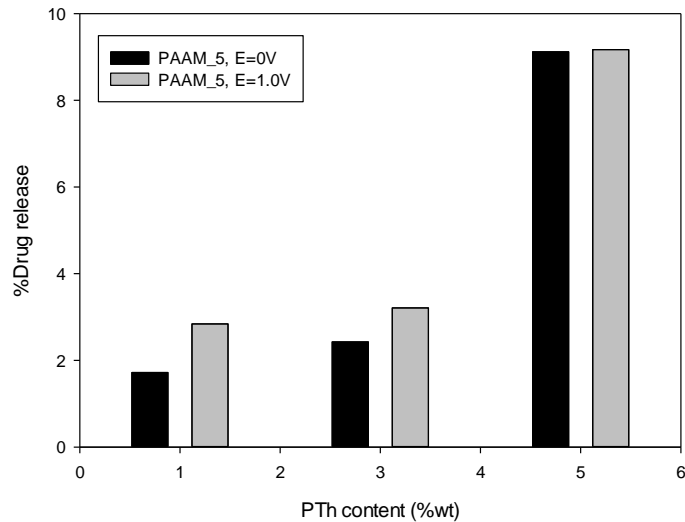
ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคปต่อความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์ ได้ทำการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนปริมาณพอลิไทโอฟีนที่ผ่านการโคป เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าทั้งภายใต้สภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าและภายใต้กระแสไฟฟ้าความแรง 1 โวลต์ ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.13



รูป 4.13 ความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอฟิน/พอลิอะคริลาไมด์ที่มีปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปต่างๆ

จากรูป 4.13 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปต่างๆ มีอัตราการปลดปล่อยยาก่อนข้างสูงในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีอัตราการบวมสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบระดับการบวมตัว ซึ่งโครงสร้างไฮโดรเจลนำไฟฟ้าเกิดการขยายตัวและทำให้ช่องว่างในโครงสร้างไฮโดรเจลมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกระหว่างภายในฟิล์มไฮโดรเจลและสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตทภายนอกก่อนข้างสูง ส่งผลให้กรดซัลฟิวริกสามารถแพร่ออกจากฟิล์มไฮโดรเจลสู่สารละลายภายนอกได้มากในช่วงแรก และพบว่าภายใต้สภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องจากเมื่อปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปเพิ่มขึ้น ทำให้มีโมเลกุลยาดันแบบที่บรรจุไว้ภายในฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีปริมาณยาที่สามารถถูกปลดปล่อยออกมามากกว่า

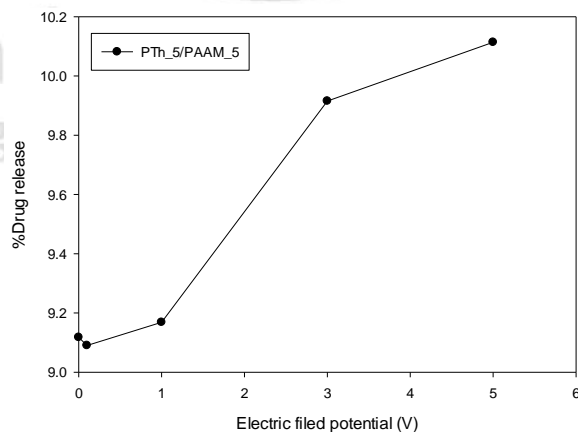
รูป 4.14 แสดงเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคปต่างๆ ทั้งในสภาวะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าและสภาวะที่กระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 1 โวลต์ ซึ่งพบว่าภายใต้กระแสไฟฟ้าความแรง 1 โวลต์ ที่เวลา 6 ชั่วโมง ฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้ามีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้นภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า โดยฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณพอลิทีโอฟินที่ผ่านการโคป เท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้น 2.842, 3.212 และ 9.168 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูป 4.14 ความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่ปริมาณพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคปต่างๆ ภายใต้ศักย์ไฟฟ้า 0 และ 1 V ที่เวลา 6 ชั่วโมง

### อิทธิพลของความแรงกระแสไฟฟ้า

ในการศึกษาอิทธิพลของความแรงกระแสไฟฟ้าต่อความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอพีน/พอลิอะคริลาไมด์ ได้ทำการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่มีปริมาณสารเชื่อมขวาง เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณพอลิทีโอพีนที่ผ่านการโคปเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าภายใต้การกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าความแรงต่างๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงดังรูป 4.15



รูป 4.15 ความสามารถในการปลดปล่อยยาของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิทีโอพีน/พอลิอะคริลาไมด์ภายใต้การกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าความแรงต่างๆ ที่เวลา 6 ชั่วโมง

จากรูป 4.15 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน/พอลิอะคริลาไมด์มีความสามารถในการปลดปล่อยยาเพิ่มขึ้น เมื่อความแรงศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใต้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุลบของโมเลกุลยาที่ถูกโคปบนสายโซ่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิไทโอฟีน จึงทำให้โมเลกุลของยาสามารถหลุดออกจากสายโซ่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่บรรจุอยู่ในฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นด้วยแรงขับสองชนิด คือ แรงผลักทางไฟฟ้าและการแพร่ จึงส่งผลให้กรดซาลิไซลิกถูกปลดปล่อยออกจากฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าสู่สารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตทในปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้สนามไฟฟ้ายังสามารถช่วยสร้างทางเดิน (Path) ชั่วคราวภายในฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้า ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของยาผ่านส่วนต่างๆ ของฟิล์มไฮโดรเจลนำไฟฟ้าสามารถเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้น [33]



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved