



การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ  
ด้วยแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปันพอลิอะคริไลไนไตร์  
ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว

โดย

พิมลพรรณ เนียมกลาง

ธีรินทร์ คงพันธุ์

บวรกิตติ เนคมานุรักษ์

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2558

The study of heavy metal ions adsorption on modified  
electrospun polyacrylonitrile nanofiber mats

By

Pimolpun Niamlang

Teerin Kongpun

Bawornkit Nekhamanurak

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2015

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณศาสตราจารย์พิเศษ ศุภผล วิทยาลัยปิโตรเลียมปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และรองศาสตราจารย์นฤมล เครื่ององอาจนุกูล คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ในการอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้ที่เกี่ยวข้องและบุคคลที่สนใจสำหรับนำไปศึกษา พัฒนา เพื่อเป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ ต่อไป

พิมลพรรณ เนียมกลาง และคณะ

ตุลาคม 2558

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A45 / 2558

ชื่อโครงการ : การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะด้วยแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินนิงพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว

ชื่อนักวิจัย : ดร.พิมลพรรณ เนียมกลาง ดร.ธีรินทร์ คงพันธุ์ และ ดร.บวรกิตติ์ เนคมานุรักษ์

ในปัจจุบันมีโลหะหนักหลากหลายชนิดที่ปนมากับน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนของทองแดงและตะกั่ว ซึ่งสามารถก่อให้เกิดปัญหาด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและร่างกายมนุษย์ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาและพัฒนาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของทองแดงและตะกั่วด้วยแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ โดยแผ่นเส้นใยดังกล่าวผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต หลังจากนั้นทำการดัดแปรพื้นผิวเส้นใยด้วย อะมิโนเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณสมบัติเฉพาะบนพื้นผิว หลังจากนั้นศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมในการดูดซับไอออนของทองแดงและตะกั่ว ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างและความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ระยะเวลาในการดูดซับ เมื่อระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้น พบว่าปริมาณของไอออนโลหะที่ถูกดูดซับมีปริมาณมากขึ้นแปรผันตามเวลาและเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและตะกั่วที่ได้ทำการศึกษาทั้งในระบบเดี่ยวและระบบผสม พบว่าแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้นั้นมีพฤติกรรมในการดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ และสามารถดูดซับไอออนดังกล่าวในระบบเดี่ยวได้ในปริมาณกว่าระบบผสม มีการเลือกดูดซับไอออนทองแดงด้วยประสิทธิภาพที่ดีกว่า จากผลการทดลองสามารถสนับสนุนการนำแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการดัดแปรผิว การดูดซับ การกำจัดโลหะหนัก

---

E-mail Address : pimolpun.kam@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2557 – กันยายน พ.ศ. 2558

## Abstract

**Code of project** : A45/ 2014

**Project name** : The study of heavy metal ions adsorption on modified electrospun polyacrylonitrile nanofiber mats

**Researcher name** : Dr.Pimolpun Niamlang, Dr.Teerin Kongpun and Dr.Bawornkit Nekhamanurak

The electronics industries produced a large quantity of wastewater containing both of Cu(II) and Pb(II) ions that may result in significant problems to an environment and human body. The main objective of this study was to remove metal ions using polyacrylonitrile (PAN) fibers. PAN fiber mats were fabricated by electrospinning technique and further modified to contain amidino tetraethylenepentamine chelating groups on their surface. Then, the evaluation of their adsorption behaviors for Cu(II) and Pb(II) ions in aqueous solution were studied. The experiments were carried out at different parameters such as initial pH, initial concentration of the metal ion solutions, contact time. An increasing of contact time resulted in a monotonous increase in adsorbed amounts of the metal ions, which finally reached equilibria at about 5 h for Cu(II) and Pb(II). The adsorption efficiency of Cu(II) and Pb(II) ions on fiber mats from single heavy metal ion solutions were higher than binary heavy metal solution. This would be the effect from co-metal ion competition among the presence of other heavy metals. Equilibrium modeling of the adsorption isotherm showed that adsorption of Cu(II) and Pb(II) on the fiber mats were able to be described by Langmuir model. This study provides a promising adsorbent in heavy metal ions wastewater treatment.

**Keywords** : electrospinning process, modified PAN fiber, adsorption, metal removal

---

**E-mail Address** : pimolpun.kam@rmutr.ac.th

**Period of project** : October 2014 – September 2015

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	5
2.2 การบำบัดน้ำเสีย	7
2.3 ทฤษฎีการดูดซับ	8
2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
<b>บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย</b>	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	16
3.3 วิธีการทดลอง	16
3.3.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตร์ โดยใช้เทคนิค การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก	18
3.3.3 ศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับโลหะหนัก	19
3.3.4 ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN หลังจากดูดซับไอออนของโลหะหนัก	21
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	
4.1 ผลของการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใย ด้วยไฟฟ้าสถิต	23
4.2 ผลการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์เพื่อใช้เป็น วัสดุดูดซับโลหะหนัก	24
4.2.1 ผลของเวลาในการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์	24
4.2.2 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิวแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN	27
4.2.3 สัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
4.3 ผลของพฤติกรรมดูดซับโลหะหนัก	30
4.3.1 ผลของค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิ	30
4.3.2 ผลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก	32
4.3.3 ผลของไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนัก	34
<b>บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ</b>	37
<b>บรรณานุกรม</b>	39
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	42

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและการนำไปใช้	6
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดิชของการดูดซับไอออนของคอปเปอร์และเลดบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN	36

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1-1 แสดงกรอบแนวคิดในงานวิจัย	3
ภาพที่ 2-1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	5
ภาพที่ 2-2 แสดงลักษณะแผ่นเส้นใยนาโนพอลิอะคริลาไมด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	6
ภาพที่ 2-3 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ	10
ภาพที่ 3-1 อุปกรณ์หลักของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตในงานวิจัย	17
ภาพที่ 4-1 ภาพถ่าย SEM และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยมีความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (ภาพถ่ายมีกำลังขยาย 5000 เท่า)	23
ภาพที่ 4-2 ปฏิกริยาระหว่างพอลิอะคริลาไมด์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน	25
ภาพที่ 4-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์ที่ทำปฏิกิริยากับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาในเวลาต่างๆ	25
ภาพที่ 4-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์ (ePAN)	26
ภาพที่ 4-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์ที่ทำปฏิกิริยากับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน เวลา 16 ชั่วโมง (TEPA-ePAN 16 hr.)	26
ภาพที่ 4-6 สเปกตรัม XPS แบบสำรวจพื้นผิวของ (a) แผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์และ (b) แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN	27
ภาพที่ 4-7 สเปกตรัม XPS แบบความละเอียดสูงชนิด C1s พื้นผิวของ (a) แผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์และ (b) แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN	28
ภาพที่ 4-8 ภาพถ่าย SEM และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย TEPA-ePAN โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิอะคริลาไมด์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนเวลา 16 ชั่วโมง (ภาพถ่ายมีกำลังขยาย 5000 เท่า)	30
ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับค่า pH ของสารละลายโลหะหนักในระบบปฐมภูมิ	31
ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับค่า pH ของสารละลายโลหะหนักในระบบหัตถภูมิ	32

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับโลหะหนักในระบบทุติยภูมิกับเวลาการดูดซับโลหะหนักที่วัสดุดูดซับต่างๆ (a) คอปเปอร์ไอออนและ (b) เลดไอออน	33
ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในระบบทุติยภูมิกับความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ ที่สมดุล (a) คอปเปอร์ไอออน และ (b) เลดไอออน	35

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีโลหะหนักหลากหลายชนิดที่ปนมากับน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม โลหะบางชนิด เช่น ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี มีความจำเป็นต่อพืชและสัตว์ แต่ถ้าหากมีปริมาณมากเกินไปก็สามารถเป็นพิษต่อสัตว์และพืชได้ ส่วนปรอท ตะกั่ว แคดเมียมและนิกเกิล สามารถทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง และมนุษย์ จึงต้องมีการกำจัดไอออนของโลหะเหล่านี้โดยการบำบัดน้ำเสีย[1] อย่างไรก็ตามโลหะหนักบางชนิดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นโลหะหนักเหล่านี้จึงต้องถูกแยกและคืนสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้[2] มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการแยกไอออนของโลหะหนักออกจากสารละลายหรือในน้ำเสียที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธีต่างๆซึ่งได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องดังนี้

การใช้สารเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resins ) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกำจัดโลหะหนักที่มีพิษ และสำหรับกักเก็บไอออนของโลหะที่มีประโยชน์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย แต่ข้อจำกัดในการใช้เรซินเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนคือไม่สามารถดูดซับไอออนของโลหะในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะต่ำๆ ได้ จากนั้นจึงมีการพัฒนามาใช้คีเลตเรซิน (chelating resins) ซึ่งมีการเลือกสรรและความสามารถในการจับไอออนของโลหะอย่างดีเยี่ยม ดังนั้นคีเลตเรซินจึงได้รับความนิยมและนำมาใช้จับไอออนของโลหะในการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามคีเลตเรซินต้องอาศัยอุณหภูมิค่อนข้างสูงในการผลิตและใช้เวลานานในการสกัดและทำให้บริสุทธิ์โดยใช้สารประกอบอินทรีย์ และอัตราการไหลของของไหลในการแยกไอออนค่อนข้างช้า[3]

ต่อมาจึงมีการพัฒนาและแก้ปัญหาข้างต้นโดยการผลิตเส้นใยคีเลต (chelating fiber) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าการคีเลตเรซิน นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับ (adsorbed) และปล่อยไอออนจากการดูดซับ (desorbed) จากพื้นผิวสัมผัสได้ งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์เส้นใยคีเลตจากหนึ่งขั้นปฏิกิริยาซึ่งเตรียมได้จากผ้าพอลิอะคริโลไนไตร์ (polyacrylonitrile cloth) วิธีการที่ใช้สามารถทำได้รวดเร็ว แม่นยำ และสะดวกในการใช้ [4-6]

สารประกอบคีเลตเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการฟอร์มวงแหวนโดยใช้พันธะโคออร์ดิเนต มีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิดทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้นมาสามารถฟอร์มพันธะโคออร์

ดีแตนกับไอออนของโลหะได้ ความสามารถของคิเลตเอเจนต์คือลดความสามารถของไอออนโลหะซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม[5, 6]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาผ้าอะครีโลไนไตร์ได้รับความสนใจในการนำมาเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของหมู่ไนไตร์ให้เป็นหมู่คิเลตเพื่อสร้างพันธะเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ ซึ่งการใช้ผ้าคิเลตมีข้อดีคือมีพื้นที่สัมผัสที่มากกว่าเรซินทำให้การดูดซับไอออนโลหะได้ดีกว่าโดยที่น้ำหนักของวัสดุเท่ากัน

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก ในปัจจุบันเทคนิคนี้กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีข้อดีหลายประการดังนี้ 1) เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานโนเมตรจนถึงประมาณหนึ่งถึงสอง ไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่าเส้นใยนาโนหรืออิลคโตรสปินนาโนไฟเบอร์ 2) เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากเป็นพิเศษในขณะที่มีน้ำหนักเบา 3) ผ้าที่ได้จากเส้นใยนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของของเหลวหรือแก๊สได้ดี 4) ความสามารถในการควบคุมขนาดเส้นใยรวมถึงขนาดและรูปร่างของรูพรุนด้วยการควบคุมตัวแปรของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต[7-9] นอกจากนี้เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ผลิตเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์ที่หลากหลาย ด้วยอัตราการผลิตที่สูงกว่าเทคนิคอื่น ๆ และ ความไม่ซับซ้อนของเครื่องมือ ข้อดีต่างๆ ดังกล่าวทำให้มีการนำเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมาใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยขนาดนาโนเมตรและนำมาใช้งานในงานต่างๆ เช่น เป็นวัสดุโครงสร้างในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ[10] เป็นระบบนำส่งยา[11] นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปรพื้นผิวเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนของโลหะได้อีกด้วย[12, 13]

ในงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาวัสดุที่ใช้ในการจับไอออนของโลหะหนัก โดยการนำกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมาใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วง 150-300 นาโนเมตร เส้นใยที่ได้จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ทอเป็นผ้า ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำแผ่นเส้นใยอิลคโตรสปินมาปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นแผ่นเส้นใยคิเลต เพื่อใช้เป็นวัสดุในการจับไอออนของโลหะหนักในสารละลายหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

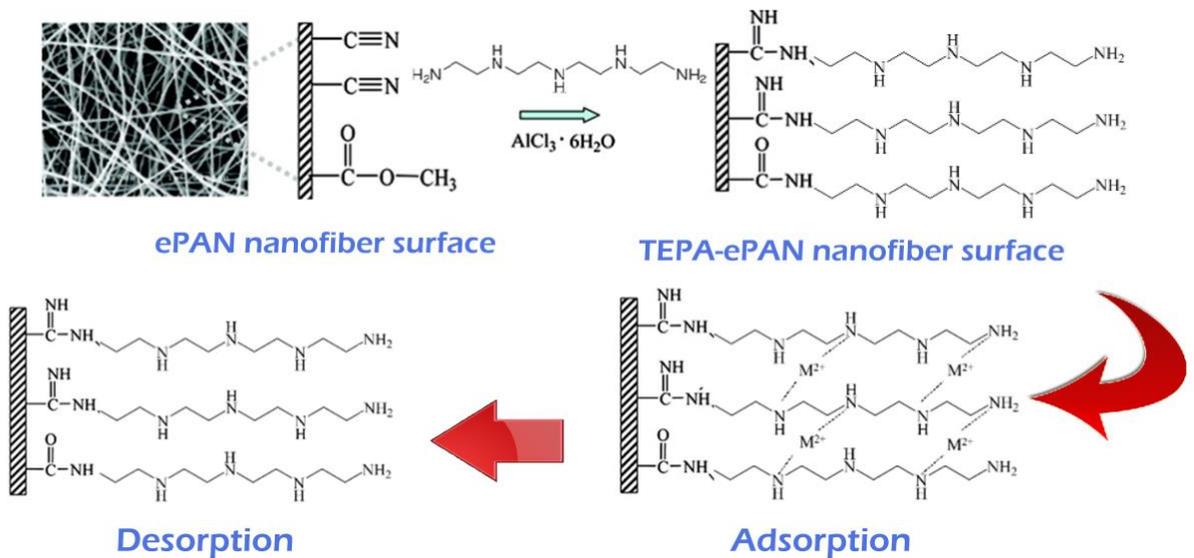
- 1.2.1 เตรียมแผ่นเส้นใยนาโนของพอลิอะครีโลไนไตร์โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 1.2.2 ปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นเส้นใยนาโนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเส้นใยอิลคโตรสปินพอลิอะครีโลไนไตร์ด้วยอะมิโนเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณสมบัติเฉพาะบนพื้นผิว

1.2.3 ศึกษาสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะหนักบนแผ่นเส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของทองแดงและตะกั่ว

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ขึ้นรูปเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 1.3.2 ปรับปรุงพื้นผิวแผ่นเส้นใยนาโนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินพอลิอะคริโลไนไตร์ด้วยอะมิโนเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน (Tetraethylenepentamine)
- 1.3.3 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ เช่น ขนาดของเส้นใย ปริมาณการยึดติดของหมู่เอมีน
- 1.3.4 นำแผ่นเส้นใยนาโนที่เตรียมได้มาทดสอบความสามารถในการดูดซับไอออนของทองแดงและตะกั่วทั้งในระบบเดี่ยวและระบบผสมเพื่อศึกษาความสามารถในการเลือกดูดซับไอออนของโลหะแต่ละชนิด และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณในการดูดซับเช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ
- 1.3.5 นำแผ่นเส้นใยที่ผ่านการดูดซับไอออนของโลหะมาผ่านการฟื้นฟูสภาพ (recovery) ในสารละลายกรดเจือจางชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาความสามารถในการนำมาใช้ซ้ำของแผ่นเส้นใยนาโนที่เตรียมได้

### 1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1-1 แสดงกรอบแนวคิดในงานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้แผ่นเส้นใยนาโนคิเลตเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนของโลหะจากน้ำเสีย
- 1.5.2 ได้พอลิเมอร์ที่สามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดเชิงพาณิชย์ที่สามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศได้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ได้ในภาคอุตสาหกรรม
- 1.5.3 ได้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการการดูดซับ โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ

## บทที่ 2

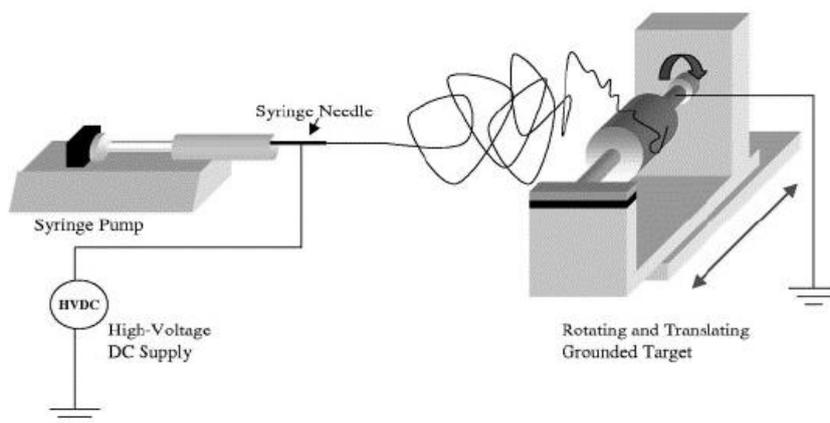
### ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.6 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เป็นเทคนิคหนึ่งในกระบวนการผลิตเส้นใยระดับนาโนเมตรที่เตรียมจากของเหลวพอลิเมอร์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอมเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์ก็ได้ กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นการใช้ความต่างศักย์สูงต่อเข้ากับปลายเข็มฉีดยาที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ หากความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าแรงตึงผิวของสารละลาย จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งลงสู่แผ่นรองรับที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า (แผ่นโลหะ) จากรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักเพียง 3 อย่าง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์ (High-voltage power supply) หลอดรูเล็กที่ทำจากเข็มฉีดยา (Syringe) และแผ่นรองรับโลหะ (Collector)

เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร
2. มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง น้ำหนักเบา
3. มีค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาวสูง ตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนไฟเบอร์
4. มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของของเหลวหรือแก๊สได้ดี
5. สามารถปรับปรุงพื้นผิวได้ง่าย

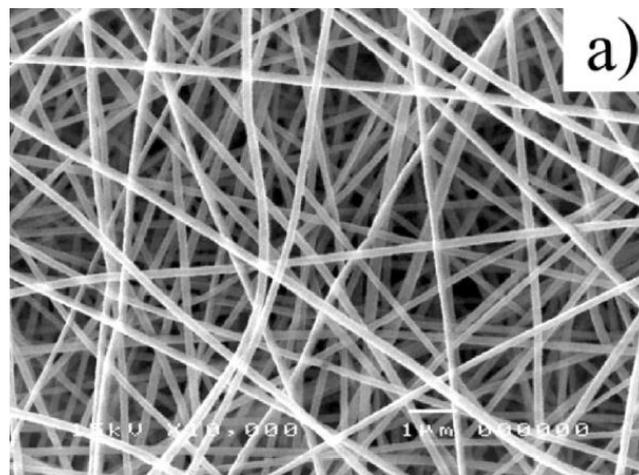


ภาพที่ 2-1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

จากคุณสมบัติของเส้นใยนาโนข้างต้น ส่งผลทำให้มีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพ ที่ดีมากเหมาะสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งต้องการความได้เปรียบของขนาดที่เล็กมากๆ

ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีและสารที่นำมาใช้ประดิษฐ์ ปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ผ้าปิดแผล ระบบนำส่งยา เฟสคงที่สำหรับแยกสารประกอบ ด้วยวิธีโครมาโทกราฟีแบบชั้นบาง ระบบการกรองอย่างละเอียด และสามารถดัดแปรพื้นผิวเพื่อเป็นวัสดุดูดซับได้อย่างดีเยี่ยม เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนที่ได้จากระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ 1) ปัจจัยที่ขึ้นกับกระบวนการขึ้นรูป ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความหนืด ความต่างศักย์ ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับแผ่นรองโลหะ และอัตราการไหลของสารละลาย 2) ปัจจัยที่ขึ้นกับสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้น [7, 14]



ภาพที่ 2-2 แสดงลักษณะแผ่นเส้นใยนาโนพอลิอะครีโลไนไตร์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และการนำไปใช้

Polymer	Solvent	Perspective Application
Nylon6,6, PA-6,6	Formic acid	Protective clothing
Polyurethanes, PU	Dimethyl formamide	Electric, filter
Collagen-PEO	Hydrochloric acid	Wound healing, tissue Engineering
Polyaniline (PANI)/PEO	Chloroform	Conductive fiber
Polyvinylcarbazole	Dichlormethane	Sensor, filter

Polymer	Solvent	Perspective Application
Cellulose acetate, CA	Acetone, acetic acid, dimethylacetamide	Membrane
PLGA PLGA(PLA/PGA)=(85/15)	Tetrahydrofuran:dimethylformamide (1:1)	Scaffold for tissue engineering
Polyvinil alcohol, PVA	Distilled water	Drug delivery system
Polylactic acid, PLA	Dichloromethane	Drug delivery system
Polyacrylonitrile, PAN	Dimethyl formamide	Carbon nanofiber

## 2.2 การบำบัดน้ำเสีย

สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน

1.5.1 การตกตะกอน (precipitation) ในกระบวนการบำบัดน้ำ คือการที่อนุภาคขนาดเล็กเกิดการรวมตัวให้ใหญ่ขึ้นแล้วตกตะกอนนอนก้นลงไป โดยนิยมใช้สารส้ม เหล็กของเหล็ก และพอลิเมอร์ อินทรีย์สังเคราะห์

1.5.2 การกรอง (filtration) คือการใช้วัสดุกรองแยกอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำและมีขนาดใหญ่กว่า วัสดุตัวกรอง ได้แก่ ตะกอน ดิน ทราย เหล็ก แมงกานีส อินทรีย์วัตถุ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก

1.5.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ใช้ในการแยกสารอนินทรีย์ที่ไม่สามารถกำจัดออกได้ ด้วยการกรองหรือการตกตะกอน โดยการแลกเปลี่ยนประจุจะใช้ในการแก้ไขน้ำกระด้างโดยจะแยกสารหนู โครเมียม ไนเตรท เรเดียม และยูเรเนียม เป็นต้น

1.5.4 การดูดซับ (adsorption) จะใช้แยกสารอินทรีย์ สี กลิ่น และรสที่ปนเปื้อน โดยอาศัยสารดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์

1.5.5 การฆ่าเชื้อ (disinfection) ในน้ำเสีย สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ คลอรีน คลอรามิน คลอรีนออกไซด์ ซึ่งรวมไปถึงการฆ่าเชื้อที่อยู่ในท่อที่ส่งออกด้วยการใช้โอโซน และการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต

[15]

## 2.3 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า(interface) ของตัวดูดซับ (adsorbent) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง ในการดูดซับได้กำหนดนิยามที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

Adsorbate	หมายถึง	โมเลกุลของตัวถูกดูดซับโดยผิวของตัวดูดซับ
Adsorbent	หมายถึง	ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะของ adsorbate
Adsorption	หมายถึง	การดูดซับ
Absorption	หมายถึง	การดูดซึม
Solute	หมายถึง	โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว
Sorption	หมายถึง	การดูดติดทั้งสองชนิด ได้แก่ การดูดซับและการดูดซึม

ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ ซึ่งกลไกการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรง แวน เดอ วาลส์ (van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน ตัวอย่างเช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งภายในโครงสร้างของพื้นที่ผิวมีรูพรุนมากทำให้มีการดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับสูงขึ้น ดังนั้นรูพรุนของสารดูดซับจึงมีความสำคัญ

2.3.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะและการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง

## 2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอมการดูดซับแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

### 2.4.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (1)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \text{-----}(2-1)$$

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$q_m$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัว ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ( $\text{mg L}^{-1}$ )

$K_L$  = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ( $\text{L mg}^{-1}$ )

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ  $1/q_m$

#### 2.4.2 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (2)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{-----}(2-2)$$

เมื่อ  $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ( $\text{mg L}^{-1}$ )  $q_e$

= ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$K_F$  และ  $n$  = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการพรอยด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{-----} (2-3)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน สามารถนำมาหาค่า  $K_F$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$  บางกรณีทีพล็อตกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบน ไปจากสมการของพรอยด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

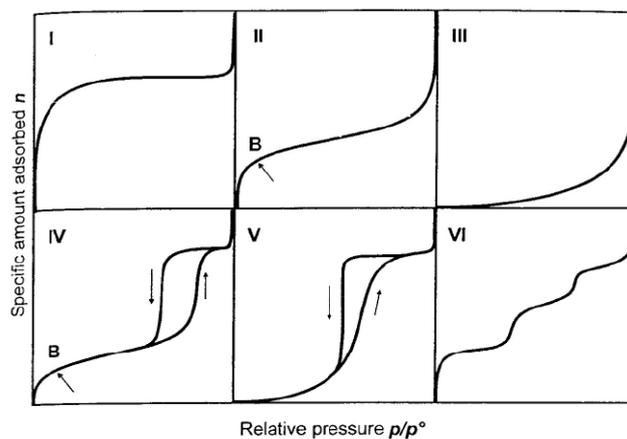
#### 2.4.3 ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm)

ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และ ในปี ค.ศ.1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอดังสมการ (4)

$$\frac{P \cdot P_0}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_0 K} + \frac{P}{P_0} \quad \text{----- (2-4)}$$

- เมื่อ  $P$  = ความดันสมดุลของสารดูดซับ  
 $V$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน  
 $V_0$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว  
 $P_0$  = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ  
 $K$  = ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมออกเป็น 5 แบบ ดังรูป 3 ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้



ภาพที่ 2-3 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ

แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอิมมัตว์ที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว

แบบ II และ III เป็นไอโซเทอมที่สารดูดซับที่การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างในระบบนี้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว จนถึงโมเลกุลหลายชั้น โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II

แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับ ที่มีรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer)

แบบ V เป็นไอโซเทอมที่เกิดขึ้น เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีความแรงมากขึ้น [16]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1997 เมคคอมบ์และเกสเซอร์ ได้ทำการเตรียมผ้าพอลิอะคริโลอะมิโดไซม์ โดยใช้ผ้าพอลิอะคริโลไนไตร์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเอมีนในเมทานอล ในการเตรียมมีการทำซ้ำ และหาสภาวะที่เหมาะสมโดยมีตัวแปรคือ เวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลเอมีนคลอไรด์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เมื่อนำผ้าพอลิอะคริโลอะมิโดไซม์ที่เตรียมได้มาศึกษาการดูดซับไอออนของทองแดง และตะกั่ว พบว่าสามารถดูดซับไอออนของทองแดง และตะกั่วมีค่าเท่ากับ 71.2 และ 450 มิลลิกรัมต่อกรัมของผ้า [17]

ในปี ค.ศ. 2001 ฉางและคณะ ได้ทำการเตรียมผ้าคิเลตพอลิฟีนิลอะมิตร้าโซน ฟีนิลไฮดราไซด์ ซึ่งเกิดจากการดัดแปรพื้นผิวของผ้าพอลิอะคริโลไนไตร์เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับไอออนของ Ga(III), In(III), Bi(III), V(V) และ Ti(IV) ออกจากสารละลาย (5–50 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรของ Ti(IV) หรือ V(V) และ 50–500 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรของ Ga(III), In (III) หรือ Bi(III) ใน 1000–100มิลลิลิตรของสารละลาย) โดยตัดผ้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหน้า 0.15 กรัม อัตราการไหลเป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที ในค่าความเป็นกรด-ต่างในช่วง 5-7 ซึ่งสามารถดูดซับไอออนดังกล่าวได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาพวกเขาได้สังเคราะห์เส้นใยคิเลตพอลิอะคริไลด์ฟีนิลอะมิตร้าโซน ไดไนโตรอะคริไลด์ฟีนิลไฮดราซีน จากพอลิอะคริโลไนไตร์ เพื่อใช้ในการดูดซับไอออนของ Au(III), Ru(III), In(III), Bi(III), Zr(IV), V(V), Ga(III) และ Ti(IV) ออกจากสารละลาย ผลที่ได้คือไอออนของ Au(III), Ru(III), In(III), Bi(III), Zr(IV), V(V), Ga(III) and Ti(IV) ปริมาณ 10–100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถถูกดูดซับได้ดีในช่วงความเป็นกรด-ต่างคือ 4-5 และสภาพคืบสภาพได้โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถคืบสภาพได้สูงถึง 95% [18]

ในปี ค.ศ. 2003 เแดงและคณะ ทำการดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้เส้นใยไฮโดรไลซ์พอลิอะคริโลไนไตร์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบนผิวจากหมู่น้ำยาโนเป็นคอนจูเกตอิมิโน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไอออน

ของทองแดงสูงขึ้น ปริมาณไอออนของทองแดงสูงสุดที่ถูกดูดซับบนเส้นใยไฮโดรไลซ์พอลิอะคริโลไนไตรต์มีค่าเท่ากับ 29.64 มิลลิกรัมต่อหนึ่งกรัมของเส้นใย[19]

ในปีต่อมา ค.ศ. 2004 โคและคณะ ศึกษาผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับไอออนบวกและไอออนลบบนเส้นใยพอลิอะคริโลอะมิโน ไดเอทิลีนไดเอมีน เส้นใยที่เตรียมได้เกิดจากตัดแปรรูปผิวของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรต์ด้วยไดเอทิลีนไดเอมีน โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไอออนที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้คือ  $\text{CrO}_4^{-2}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , และ  $\text{Ag}^+$  ที่ค่าพีเอชต่างๆ จะมีเพียงพันธะไอออนิก ในขณะที่ที่ค่าพีเอชสูงๆ ไม่พบพันธะใดๆ อย่างไรก็ตาม ที่ช่วงพีเอชระดับปานกลาง พบว่ามีทั้งพันธะไอออนิกและพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างพอลิอะคริโลอะมิโน ไดเอทิลีนไดเอมีน กับไอออนโครเมต ฟอสเฟต และไอออนของโลหะ ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , and  $\text{Ag}^+$ ) ความสามารถในการดูดซับไอออนแต่ละชนิดบนเส้นใยพอลิอะคริโลอะมิโน ไดเอทิลีนไดเอมีนสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้  $\text{Ag}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$  [20]

ในปี ค.ศ.2006 จุฑาวรรณ สุธาสิลพรมแพร และคณะได้ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยนาโนพอลิอะคริโลไนไตรต์ด้วยไฟฟ้าสถิต จากสารละลายพอลิอะคริโลไนไตรต์โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เป็นตัวทำละลายในช่วงความเข้มข้นจาก 2.1% ถึง 17.4 % โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาปัจจัย (ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลาย ความหนืด แรงตึงผิว และค่าการนำไฟฟ้า) ที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เตรียมได้ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์มีผลอย่างมากต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใย ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลเพียงเล็กน้อยต่อขนาดของเส้นใย ในขณะที่ขั้วอิเล็กโทรดในการปลดปล่อยศักย์ไฟฟ้าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นใย ซึ่งช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 80 ถึง 725 นาโนเมตร [21]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2007 ลี และคณะ ได้เตรียมแผ่นเส้นใยนาโนพอลิอะคริโลไนไตรต์เพื่อใช้เป็นเยื่อในการยัดเกาะของเอนไซม์ไลเปส ความเข้มข้นของพอลิอะคริโลไนไตรต์ในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ อัตราการไหลของสารละลาย ความต่างศักย์ที่ใช้ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับถูกกำหนดให้เป็น 8% โดยน้ำหนัก, 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง, 20.0 กิโลโวลต์ และ 20.0 เซนติเมตร ตามลำดับ เส้นใยนาโนที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 150 ถึง 300 นาโนเมตร [22]

ในปี ค.ศ. 2008 ชาอิตและคณะ ทำการตัดแปรรูปผิวของเส้นใยนาโนพอลิอะคริโลไนไตรต์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้อะมิโดไซด์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ แผ่นเส้นใยนาโนที่ได้มีการตัดแปรรูปผิวด้วยอะมิโดไซด์สูงสุด 25% และไอโซเทอมในการดูดซับเป็นไปตามสมมติฐานของไอโซ

เทอมแลงเมียร์ ซึ่งอธิบายการดูดซับของไอออนเป็นเป็นขั้นเดียวค่าการดูดซับอิมตัวของไอออนทองแดงและ ตะกั่วบนผิวของเส้นใยนาโนที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 52.70 และ 263.45 มิลลิกรัมต่อหนึ่งกรัมของแผ่นเส้นใยนาโน ตามลำดับ นอกจากนี้ ไอออนของทองแดงและตะกั่วสามารถคายตัวออกจากแผ่นเส้นใยนาโนสูงถึง 90% หลังจากจุ่มแผ่นเส้นใยที่ผ่านการดูดซับแล้วลงในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [12]

ต่อมาในปีค.ศ. 2010 พิมลพรรณและคณะ ทำการเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินพอลิอะคริโลไนไตร์ โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $192 \pm 55$  นาโนเมตร จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการตัดแปรพื้นผิวผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำได้ง่าย ประหยัด และรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถของการดูดซับ ไอออนทองแดงบนผิวของแผ่นเส้นใยไฮโดรไลซ์อิเล็กโตรสปินพอลิอะคริโลไนไตร์ เปรียบเทียบกับเส้นใยไฮโดรไลซ์พอลิอะคริโลไนไตร์ที่มีขนาดของเส้นใยที่สูงกว่า ( $13.73 \pm 2.70$  ไมโครเมตร) พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนของทองแดงบนผิวของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินพอลิอะคริโลไนไตร์มีปริมาณที่สูงกว่า เนื่องจากขนาดของเส้นใยที่เล็กกว่าส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่สามารถสัมผัสกับสารละลายได้สูงกว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออนของทองแดงสูงกว่าเช่นกัน [8]

ในปีต่อมา ค.ศ. 2012 พิมลพรรณและคณะ ได้พัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินพอลิอะคริโลไนไตร์โดยการตัดแปรพื้นผิวด้วยไดเอทิลีนไดอะไมน (แผ่นเส้นใยอะมิเนตพอลิอะคริโลไนไตร์) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการฟอร์มพันธะกับไอออนของโลหะได้ดี แผ่นเส้นใยที่ได้มีการตัดแปรพื้นผิวไดเอทิลีนไดอะไมนสูงสุด  $58.5 \pm 2.4$  % ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ 4 ชนิดได้แก่ ไอออนของทองแดง ตะกั่ว เหล็ก และเงิน พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมในการดูดซับ อยู่ในช่วง 4-5 และสามารถใช้อิโซเทอมแลงเมียร์มาอธิบายลักษณะของการดูดซับได้ดี ความสามารถในการดูดซับไอออนของทองแดง เงิน เหล็ก และตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 150.6, 155.5, 116.5, และ 60.6 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ นอกจากนี้ไอออนของโลหะทั้ง 4 สามารถคายตัวออกจากแผ่นเส้นใยอะมิเนตพอลิอะคริโลไนไตร์สูงถึง 98% หลังจากจุ่มแผ่นเส้นใยที่ผ่านการดูดซับแล้วลงในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้มากกว่าสามครั้ง [13]

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High Voltage Power Supply รุ่น ES30P-5W)
- 3.1.2 ขั้วแอโนด และแคโทด (Anode and Cathode)
- 3.1.3 กระบอกฉีดยา (Syringe) และเข็มฉีดยาขนาด 22 gauge (Stainless Steel Needle)
- 3.1.4 แท่นรองรับแบบลูกกลิ้ง (Rotating Drum)
- 3.1.5 อะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foil)
- 3.1.6 เครื่องกวนสารละลาย (Hotplate and Magnetic Stirrer รุ่น RCT basic safety)
- 3.1.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM รุ่น JSM-6400)
- 3.1.8 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking bath รุ่น GFL 108 6)
- 3.1.9 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (Instruments pH 211 Microthope pH meter รุ่น Hanna)
- 3.1.10 เครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy : ATR-FTIR ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum one)
- 3.1.11 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS ยี่ห้อ Kratos Analytical รุ่น AXIR Ultra DLD)
- 3.1.12 เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น ICE 3000 series)
- 3.1.13 เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Elemental Analyzer: EA ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น PE2400 Series)

## 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 พอลิอะคริโลไนไตร์ (Polyacrylonitrile ; Acrylonitrile monomer 91.4 wt % Methylacrylate monomer 8.6 wt % ; Mw = 55.5 kDa ; Thai acrylonitrile fiber Co.,Ltd.; Thailand)
- 3.2.2 ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide ; Lab scan ; Thailand)
- 3.2.3 เตตระเอทิลเพนตะเอมีน (Tetraethylenepentamine ; Merck ; Germany)
- 3.2.4 อลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Aluminium Chloride Hexahydrate ; Ajex Finechem; Australia)
- 3.2.5 คอปเปอร์ (II) ไนเตรต (Copper Ntrate ;  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ; Ajex Finechem Australia)
- 3.2.6 เลด (II) ไนเตรต (Lead Nitrate ;  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  ; Ajex Finechem ; Australia)
- 3.2.7 แคดเมียม (II) ไนเตรต (Cadmium Nitrate ;  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ; Ajex Finechem ; Australia)
- 3.2.8 กรดไนตริก (Nitric Acid; Fisher Scientific ; The United States)
- 3.2.9 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid ; Fisher Scientific ; The United States)
- 3.2.10 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide ; Ajex Finechem ; Australia)
- 3.2.11 เอทานอล (Ethanol ; Merck ; Germany)
- 3.2.12 เบนซีน (Benzene ; Sigma-Aldrich)
- 3.2.13 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate ; Sigma-Aldrich)
- 3.2.14 แอมโมเนียม (Ammonium Hydroxide ; Sigma-Aldrich)
- 3.2.15 กรดอะซิติก (Acetic Acid ; Sigma-Aldrich)
- 3.2.16 ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane ; Sigma-Aldrich)
- 3.2.17 โทลูอีน (Toluene ; Sigma-Aldrich)

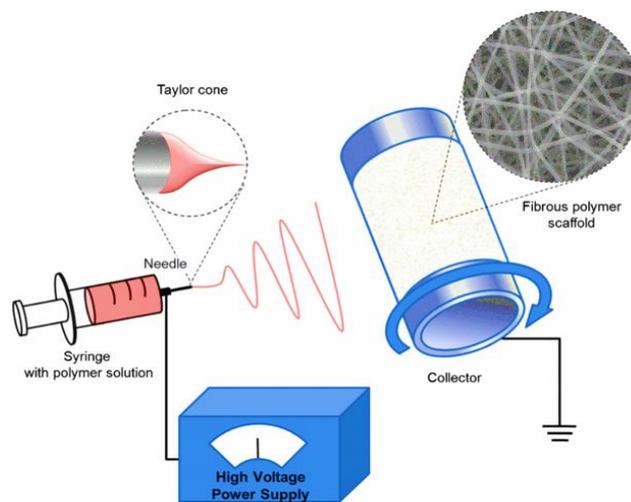
## 3.3 วิธีการทดลอง

### 3.3.5 การเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ โดยใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

#### 3.3.1.1 ศึกษาการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์

ในงานวิจัยนี้การเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่มีลักษณะของเส้นใยไม่เป็นระเบียบ (Nonwoven) ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เริ่มแรกจะศึกษาความเข้มข้นสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ จะใช้

ตัวทำละลายคือ เตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Sutasinpromprae [21] โดยเตรียมสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ เข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ใส่สารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ลงในกระบอกฉีดยาขนาด 20 มิลลิลิตร เข็มฉีดยาขนาด 22 gauge ในการทดลองจะทำการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ 20 เซนติเมตร สำหรับขั้นตอนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งอัตราการไหลของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ จะเป็นไปตามแรงโน้มถ่วงโลก (Gravity Force) อัตราการหมุนของฉากรองรับ 50 รอบต่อนาที และความชื้นในระหว่างการเตรียมเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์อยู่ในช่วง 60 - 70 %



ภาพที่ 3-1 อุปกรณ์หลักของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตในงานวิจัย

### 3.3.1.2 ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์

ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่เตรียมได้จากข้อ

3.1.1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM รุ่น JEOL JSM 5400LV) จากนั้นจะวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยโปรแกรม SemAfore 5.21 จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ จำนวน 50 เส้น จาก 5 ภาพ

### 3.3.6 การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก

นำแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่เตรียมได้สภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.1.1) มาปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนโดยทำปฏิกิริยาการเพิ่มเข้า (Addition) โดยศึกษาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนที่เวลา 16 ชั่วโมง กำหนดอัตราส่วนระหว่างแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ กับเตตระเอทิลีน เพนตะเอมีน เท่ากับ 0.6 กรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร โดยใช้อลูมิเนียมคลอไรด์ ร้อยละ 4 โดยมวล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที สภาวะดังกล่าวได้อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Pimolpun and Pitt [13] เมื่อครบเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่กำหนด นำแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่ปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลตามลำดับจนเป็นกลาง จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่ปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีแล้วจะเรียกว่าแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN จากนั้นนำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบ ATR (Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy; ATR-FTIR) และวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใยด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุ(X-ray Photo electron Spectroscopy; XPS) และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมทั้งวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโปรแกรม SemAfore 5.21 และหาร้อยละการตัดแปรรอง หมู่ไนไตร์ให้เป็นหมู่เตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน (Conversion of nitrile) โดยคำนวณจากการวัดน้ำหนักก่อนและหลังการนำแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ ที่เตรียมได้ มาปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนจากสมการ (3-1)

$$C_n = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times \frac{M_0}{M_1} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ  $C_n$  คือ ร้อยละการตัดแปรรองหมู่ไนไตร์ให้เป็นหมู่เตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน

$W_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นก่อนทำปฏิกิริยา (กรัมต่อโมล)

$W_1$  คือ น้ำหนักหลังจากการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนแล้ว (กรัมต่อโมล)

$M_0$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์อะครีโลไนไตร์ (กรัม)

$M_1$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของ TEPA-ePAN (กรัม)

### 3.3.7 ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนัก

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN โดยจะศึกษาพฤติกรรมการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทวิคูณ (Binary Metal Species System) คือไอออนของ Cu(II) และ Pb(II) ในการทดลองจะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.3.3.1 ศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนัก

ศึกษาค่า pH ของสารละลายโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก นำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้จากสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.1 น้ำหนัก 0.1 กรัม แช่ในสารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทวิคูณ ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทวิคูณ ให้มีค่า pH ตั้งแต่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 โดยใช้ กรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS) และคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ตามสมการที่ (3-2)

$$q = \frac{C_0 - C_e}{w} \times V \quad (3-2)$$

เมื่อ  $q$  คือ ความสามารถของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ในการดูดซับโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นหลังจากการดูดซับโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

*V* คือ ปริมาณของสารละลายโลหะหนัก (ลิตร)

*W* คือ น้ำหนักของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN (กรัม)

### 3.3.3.2 ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก (Contact Time)

ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในระบบทุติยภูมิด้วยแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้จากสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.1 นำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN หนัก 0.1 กรัม แช่สารละลายไอออนโลหะหนักผสม ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า pH 5 แล้วแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที โดยจะเก็บตัวอย่างตั้งแต่วเวลา 15, 30, 45, 60 นาที และ 1.5, 2, 4, 8, 12, 24 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ตามสมการที่ (3-2)

### 3.3.3.3 ศึกษาผลไอโซเทอมของการดูดซับไอออนของโลหะหนัก (Adsorption Isotherm)

ศึกษาผลไอโซเทอมของการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิด้วยแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้จากสภาวะที่เหมาะสม โดยนำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN หนัก 0.1 กรัม แช่สารละลายไอออนโลหะผสม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้น 40, 80, 120, 160, 200, 400, 800, 1000, 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบการดูดซับในสภาวะ pH 5 แล้วแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า โดยควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ตามสมการที่ (3-2)

### 3.3.8 ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN หลังจากดูดซับไอออนของโลหะหนัก

วิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN หลังจากดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยนำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้ หนัก 0.1 กรัม แช่สารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบการดูดซับในสภาวะ pH 5 แล้วแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า โดยควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบ

ต่อมาที่ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN หลังจากดูดซับไอออนของคอปเปอร์ วิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS)

### 3.3.9 ศึกษาการปรับสภาพแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN สู่อุณหภูมิเดิมหลังจากใช้งาน(Regeneration)

ศึกษาการปรับสภาพแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN สู่อุณหภูมิเดิมหลังจากใช้งาน นำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN กระบวนการดูดซับไอออนของโลหะหนัก และการคายซับของไอออนโลหะหนัก ในระบบทุติยภูมิจากแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN (Adsorption-Desorption Cycle) เป็นการศึกษาศักยภาพของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ในการนำมาใช้ใหม่ มีรายละเอียดการทดลองดังนี้

3.3.5.1 นำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN เตรียมได้ หนัก 0.1 กรัม แช่ในสารละลายคอปเปอร์ (II) ในเตรต ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ค่า pH ของสารละลายคอปเปอร์ (II) ในเตรตมีค่า pH 5 แล้วแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเย้าโดยควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ จากนั้นคำนวณ หาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ตามสมการที่ (3-3)

3.3.5.2 นำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่ดูดซับโลหะหนักแล้วมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาคายซับ (desorption) โดยนำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ดูดซับโลหะหนักแล้วแช่ในกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 20 มิลลิลิตร แล้วแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเย้า โดยควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ จากนั้นคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ตามสมการที่ (3-4)

3.3.5.3 นำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่คายซับโลหะหนัก จากข้อ 3.3.5.2 มาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเป็นกลาง แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำกลับทำการทดลองใหม่ 5 รอบ

$$\text{Percentage of desorption} = \frac{C \times V}{q \times m} \times 100 \quad (3-4)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักหลังจากคายซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$V$  คือ ปริมาณของกรดไนตริก (ลิตร)

- $q$  คือความสามารถของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ในการดูดซับโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $m$  คือ น้ำหนักของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN (กรัม)

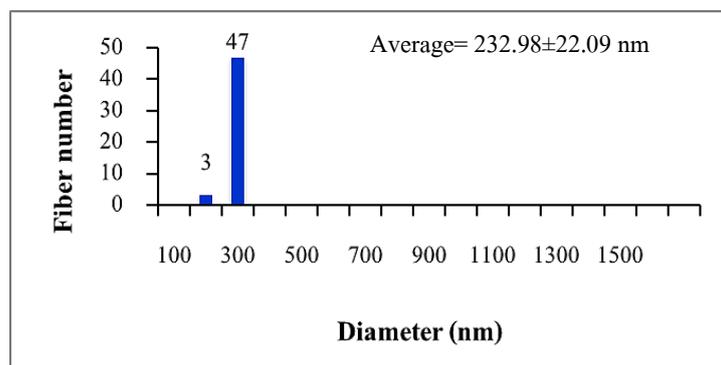
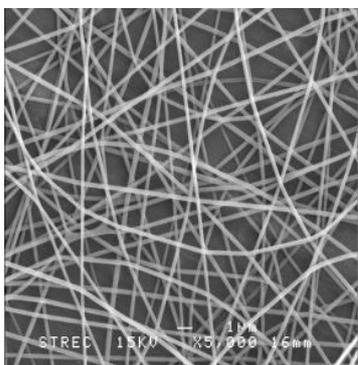
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ โดยใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และนำแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์มาปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน นำไปเพื่อประเมินศักยภาพสำหรับใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งผลการวิจัยสามารถแบ่งตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลของการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning Process)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ ค่าศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ ซึ่งลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยสามารถศึกษาได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ค่าศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับ 20 เซนติเมตร ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ แสดงดังภาพที่ 4-1 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์เป็นร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก เส้นใยที่เตรียมได้เส้นใยมีความต่อเนื่อง และมีขนาดที่สม่ำเสมอ และเส้นใยที่เตรียมได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ  $232.98 \pm 22.09$  นาโนเมตร



ภาพที่ 4-1 ภาพถ่าย SEM และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยมีความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (ภาพถ่ายมีกำลังขยาย 5000 เท่า)

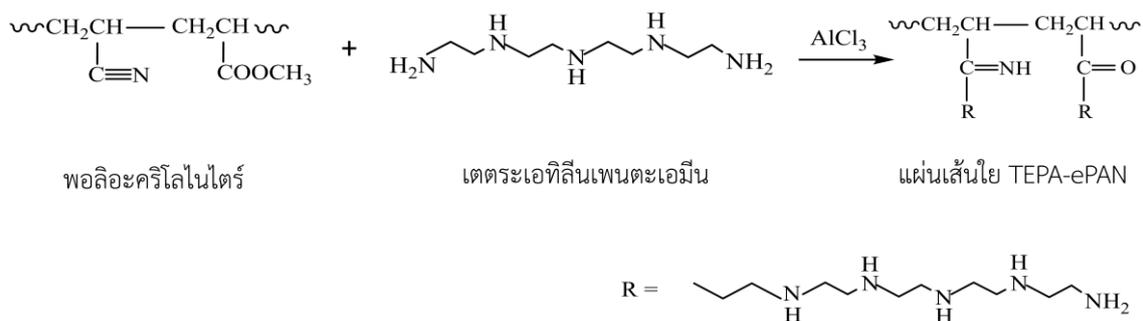
หากใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์มีค่าน้อยกว่า ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ความหนืดของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ต่ำ ส่งผลให้แรงตึงผิว (Surface Tension Force) ของ

สารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ปลายเข็มโลหะมีค่าต่ำ ดังนั้นแรงทางไฟฟ้าจึงสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์ได้ง่าย จึงทำให้สารละลายพอลิอะคริโลไนไตร์แตกออกเป็นละอองฝอย และเกิดเป็นเม็ดปมบนเส้นใย

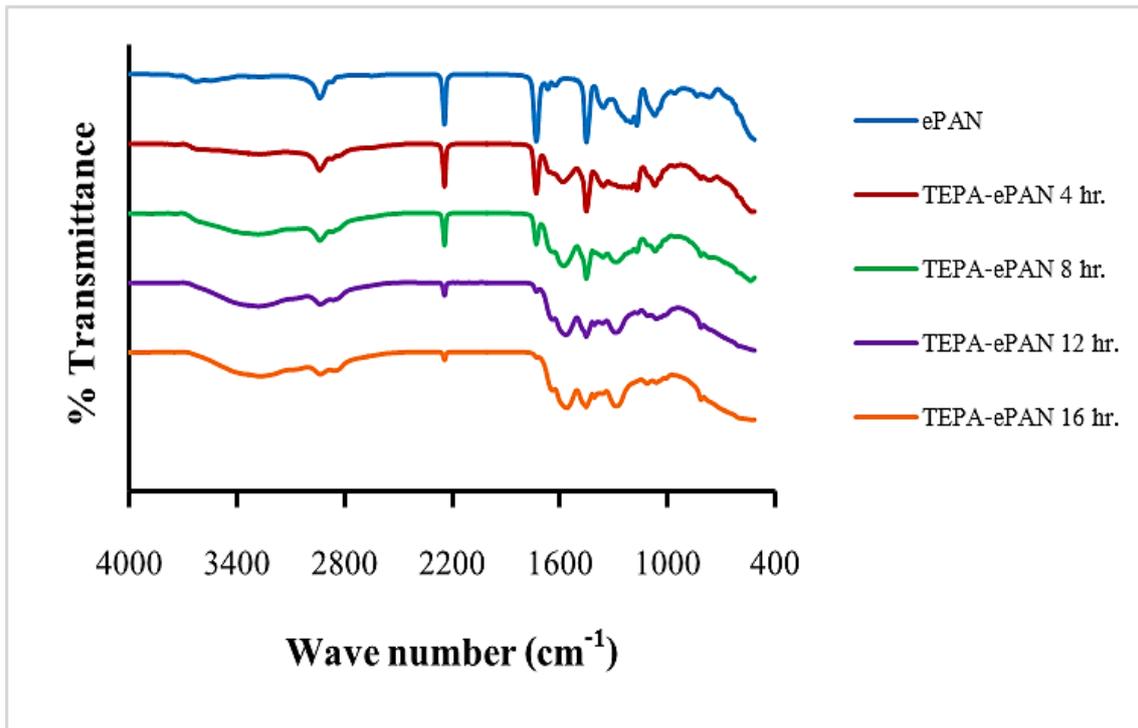
## 4.2 ผลการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก

### 4.2.1 ผลของเวลาในการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์

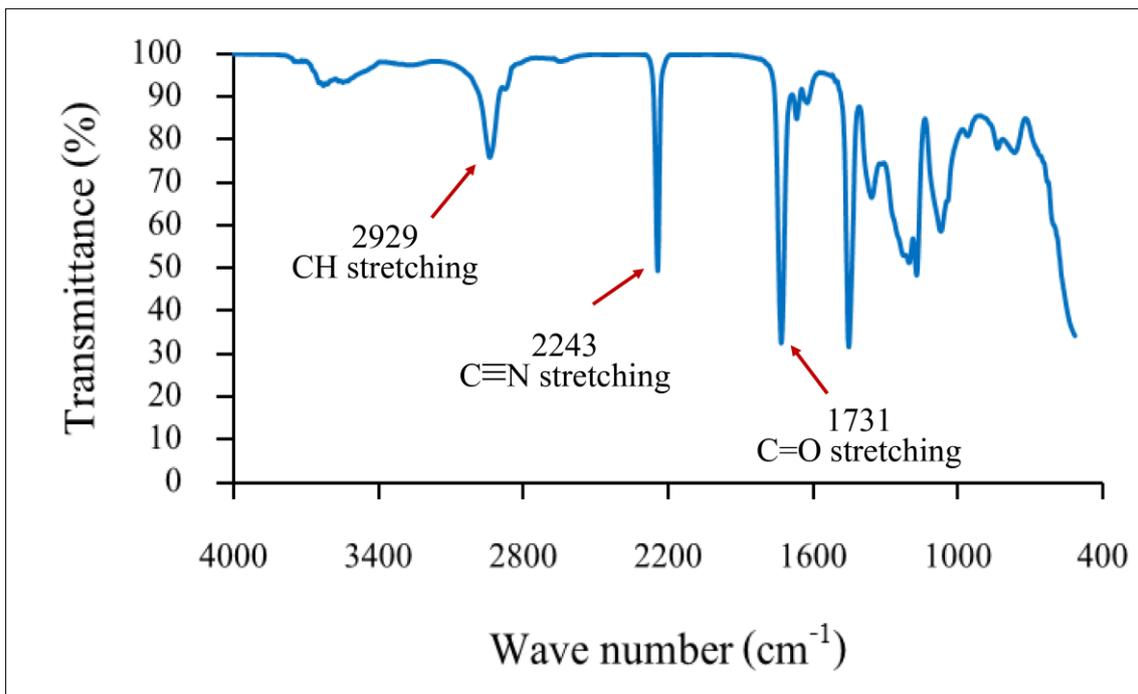
ปฏิกิริยาที่ใช้ในการการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน ได้แก่ ปฏิกิริยาการเพิ่มเข้า (Addition) แสดงดังภาพที่ 4-2 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน เป็นเวลา 4- 16 ชั่วโมง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นนำแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แบบ ATR(FT-IR)เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมอินฟราเรดของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมจากเวลา 4, 8, 12 และ 16 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4-3 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน ส่งผลต่อความเข้มของคลื่นอินฟราเรด (Intensity) ของหมู่นไนไตรล์ (Nitrile Group) ลดลง และปรากฏความเข้มของคลื่นอินฟราเรดของหมู่เอมีน (Amine Group) และหมู่อิมีน (Imine Group) สเปกตรัมอินฟราเรดของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ (ePAN) แสดงดังภาพที่ 4-4 แสดงการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ตำแหน่งของพิก 2243 และ 1731  $\text{cm}^{-1}$  เกี่ยวข้องกับการสั่นแบบยึดของพันธะ  $\text{C}\equiv\text{N}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของหมู่นไนไตรล์ (Nitrile Group) และการสั่นแบบยึดของพันธะ  $\text{C}=\text{O}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl Group) ตามลำดับ [23, 24] หากพิจารณาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง พอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน 16 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4-5 พบว่าจะเกิดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ตำแหน่งของสัญญาณพิกเลขคลื่น 3265 และ 1640  $\text{cm}^{-1}$  [8] เนื่องจากเกิดการสั่นแบบยึดของพันธะ N-H เป็นหมู่ฟังก์ชันของหมู่เอมีน (Secondary Amine) และการสั่นแบบยึดของพันธะ  $\text{C}=\text{N}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันของหมู่อิมีน (Imine Group) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ตำแหน่งของพิกสัญญาณพิก เลขคลื่น 1563  $\text{cm}^{-1}$  เกิดจากการงอของ N-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของหมู่เอมีน (Primary Amine)



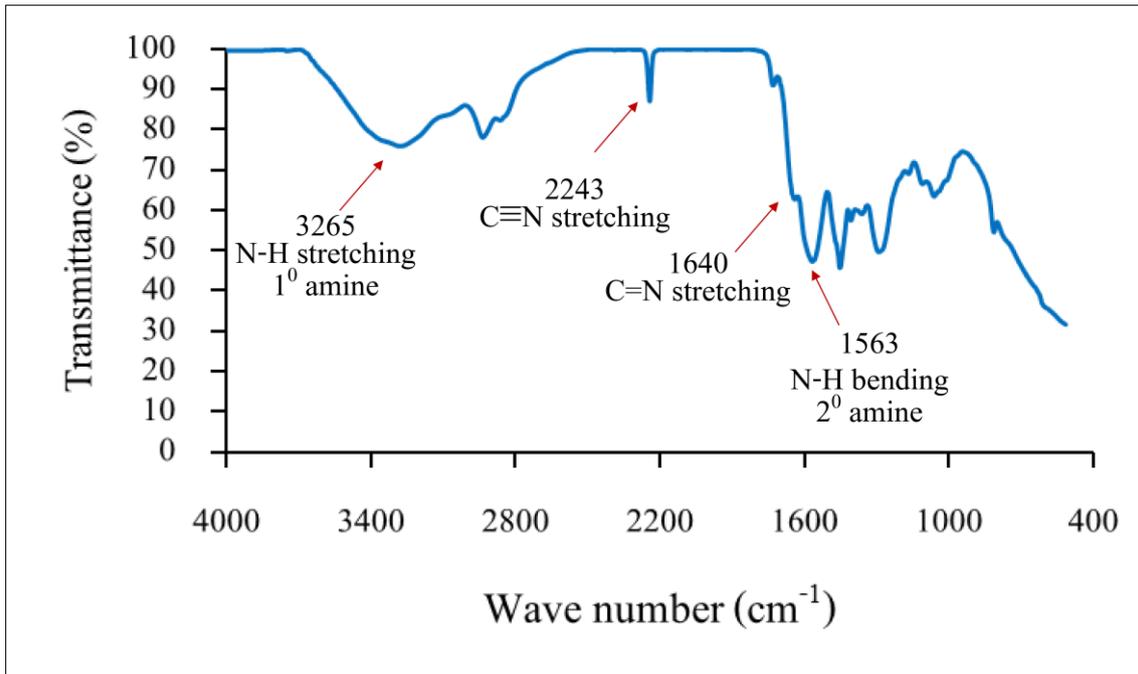
ภาพที่ 4-2 ปฏิกิริยาระหว่างพอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน



ภาพที่ 4-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไทรล์ที่ทำปฏิกิริยากับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาในเวลาต่าง ๆ



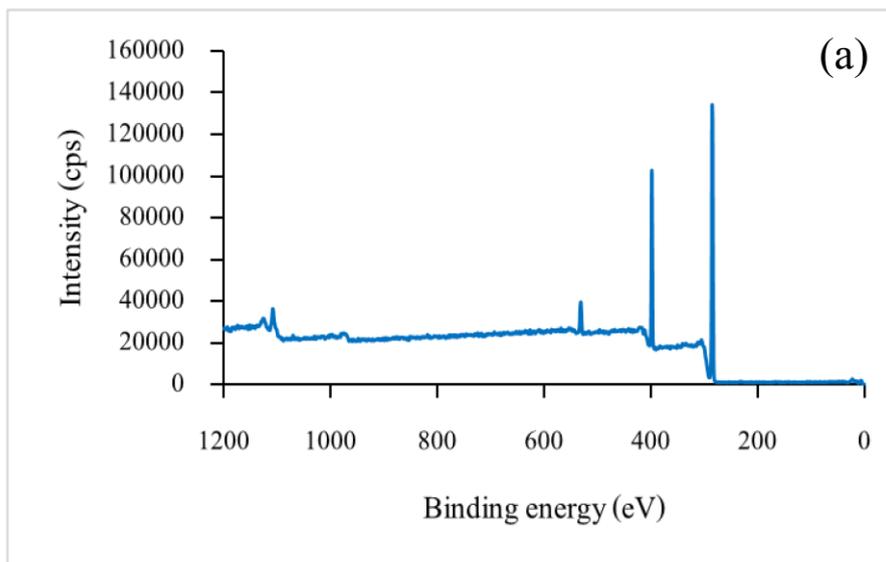
ภาพที่ 4-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไทรล์ (ePAN)

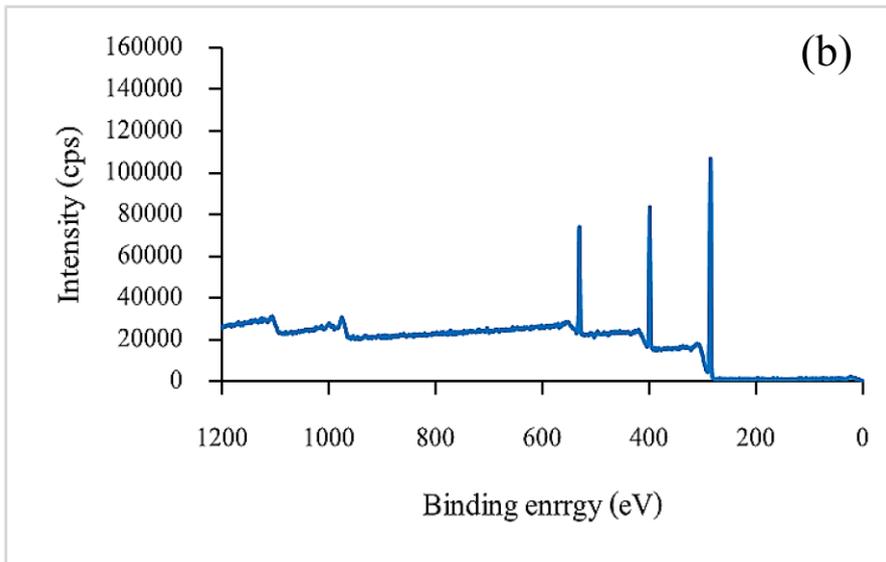


ภาพที่ 4-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์ที่ทำปฏิกิริยากับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน เวลา 16 ชั่วโมง (TEPA-ePAN 16 hr.)

#### 4.2.2 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิวแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN

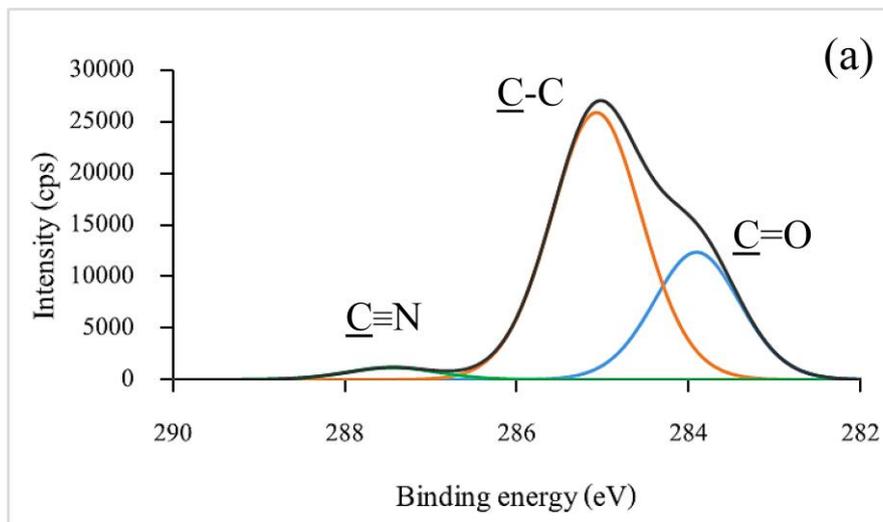
จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์ และแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยเทคนิควิเคราะห์พื้นผิววัสดุ โดยใช้เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) แบบสำรวจ (Wide Scan)

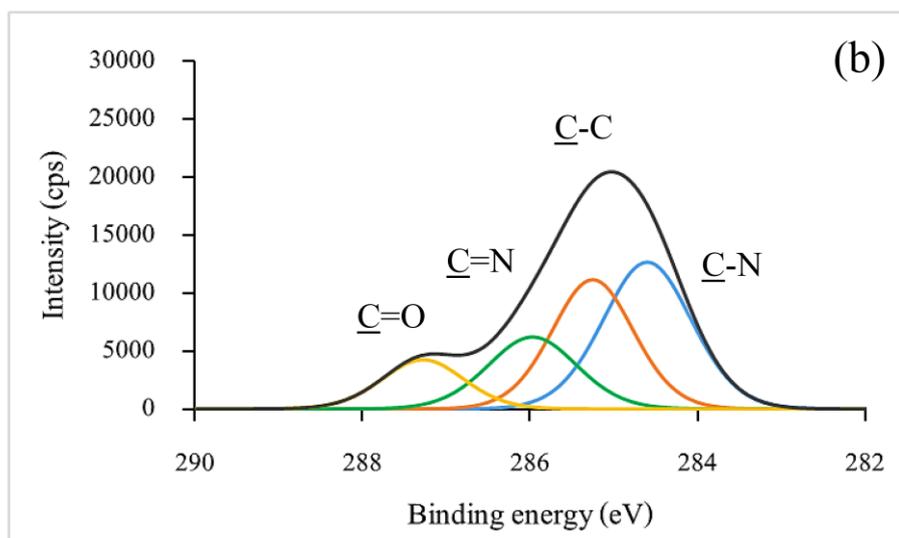




ภาพที่ 4-6 สเปกตรัม XPS แบบสำรวจพื้นผิวของ (a) แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ และ (b) แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN

พบว่าองค์ประกอบของทางเคมีของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ประกอบด้วยธาตุ C, O และ N แสดงดังภาพที่ 4-6 (a) สำหรับแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกัน แสดงดังภาพที่ 4-6 (b) เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์และแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยเทคนิค XPS แบบความละเอียดสูง (High Resolution) ชนิด C1s แสดงดังภาพที่ 4-7 (a)





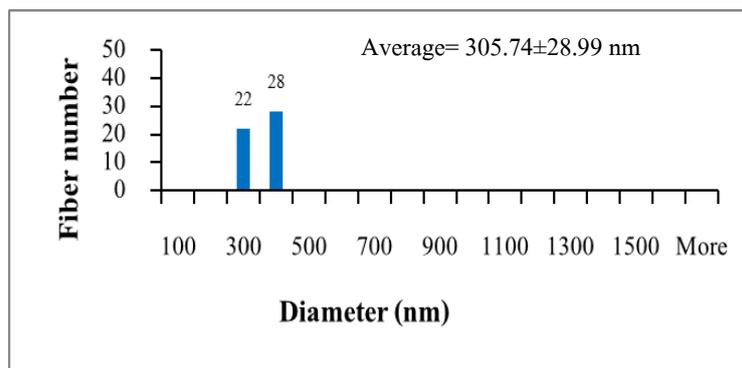
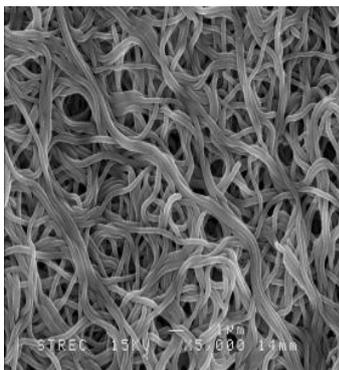
ภาพที่ 4-7 สเปกตรัม XPS แบบความละเอียดสูงชนิด C1s พื้นผิวของ (a) แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์และ (b) แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN

พบว่าแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ประกอบด้วย 3 พีก ที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 283.4, 285.06 และ 287.4 eV ทั้ง 3 พีก ปรากฏพันธะของ  $\underline{\text{C}}\text{-N}$ ,  $\underline{\text{C}}\text{-C}$  และ  $\underline{\text{C}}\equiv\text{N}$  ตามลำดับ ซึ่งจะสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ซึ่งวิเคราะห์จากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แบบ ATR สำหรับแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN เมื่อนำมาวิเคราะห์พื้นผิววัสดุด้วยเทคนิค XPS แบบความละเอียดสูง แสดงดังภาพที่ 4-7 (b) ประกอบด้วย 4 พีก ณ ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 284.5, 285.2, 285.9 และ 287.2 eV ซึ่งจะสอดคล้องกับพันธะของ  $\underline{\text{C}}\text{-N}$ ,  $\underline{\text{C}}\text{-C}$ ,  $\underline{\text{C}}\text{-N}$  และ  $\underline{\text{C}}\text{=O}$  ตามลำดับ ที่มีอยู่ในโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ และแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยเทคนิค XPS เป็นการยืนยันได้ว่าแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN จะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน ในตำแหน่งของหมู่ไนไตรล์ที่มีอยู่ในโครงสร้างของพอลิอะคริโลไนไตร์เป็นหมู่มีน

#### 4.2.3 สัญญาณวิทยาและขนาดของเส้นใย TEPA-ePAN ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนที่เวลา 16 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4-6 เมื่อพิจารณาเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนที่เพิ่มขึ้น พบว่า ลักษณะของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ยังมีความคงตัวเป็นเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีขนาดเท่ากับ  $305.74 \pm 28.99$  นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-8 เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิว ของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน อุณหภูมิในระหว่างเกิดปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส พอ

ลิวโธครีโตนไตร์มีอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, Tg) เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส [25] ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการคลายตัว (Relaxation) ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนตัว จนกระทั่งเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีน สามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้แผ่นเส้นใยพอลิเอครีโตนไตร์หลังการปรับปรุงพื้นผิวเกิดการบวมตัว (Swelling) จึงส่งผลให้ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแผ่นเส้นใยพอลิเอครีโตนไตร์กับแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN พบว่า แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN สูงขึ้น จากการเตรียมเส้นเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แล้วผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วจะมีสมบัติเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักได้ เนื่องจากแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง จึงมีพื้นที่ในการจับโลหะหนักได้ดี



ภาพที่ 4-8 ภาพถ่าย SEM และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย TEPA-ePAN โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิเอครีโตนไตร์กับเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนเวลา 16 ชั่วโมง (ภาพถ่ายมีกำลังขยาย 5000 เท่า)

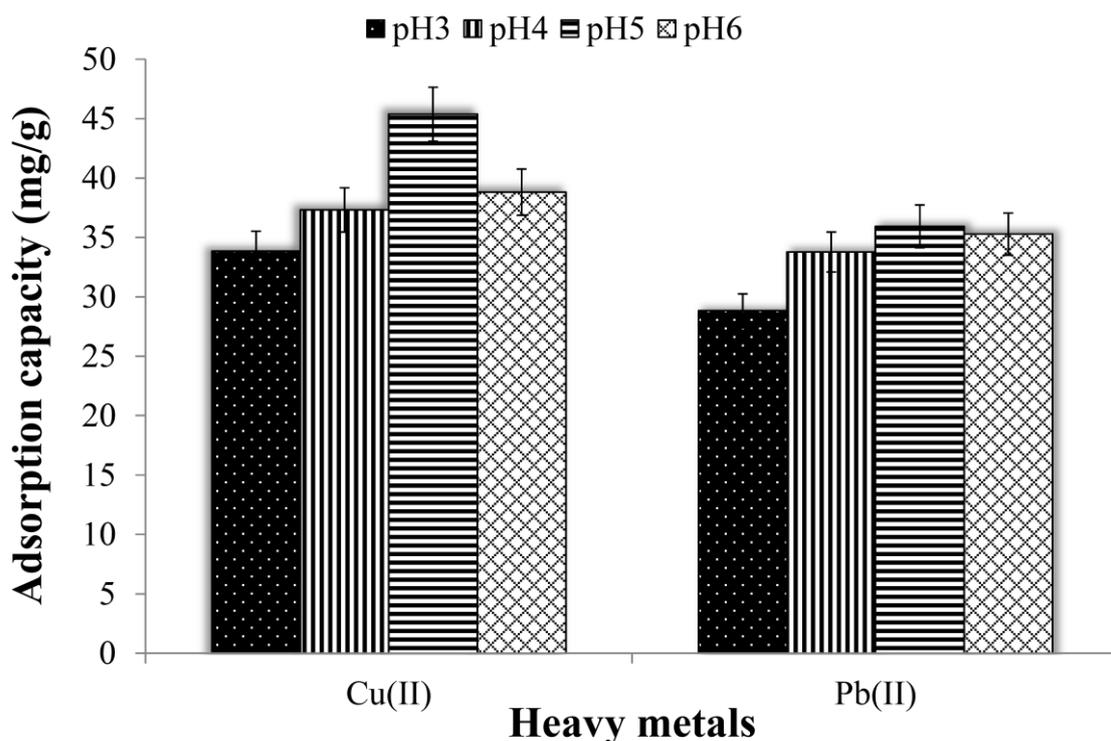
#### 4.3 ผลของพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนัก

ผลจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนัก โดยจะศึกษาพฤติกรรมการดูดซับไอออนโลหะหนักผสมในระบบทวิตยภูมิ (Binary Metal Species System) 2 ชนิด คือ คอปเปอร์ และเลด ซึ่งผลการทดลองผลจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ต่างๆ ดังนี้

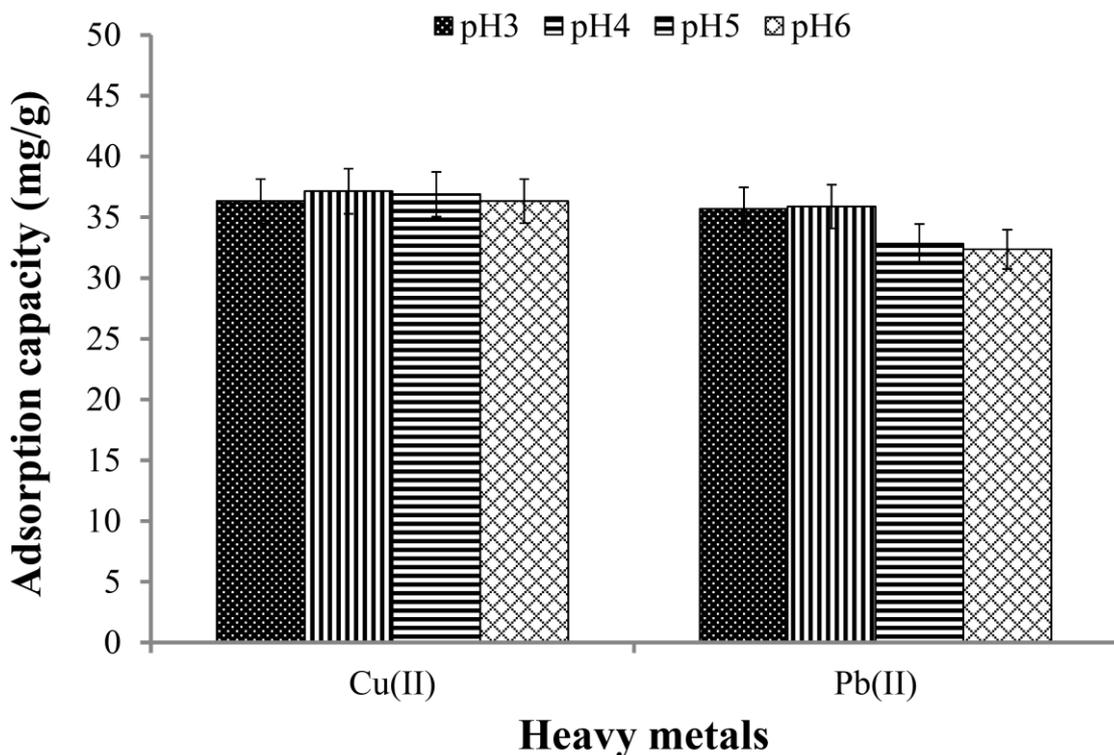
##### 4.3.1 ผลของค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทวิตยภูมิ

ผลของค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทวิตยภูมิผลของค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักแสดงดังภาพที่ 4-16 ค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทวิตยภูมิของไอออนคอปเปอร์และเลด ที่ pH 3, 4, 5 และ 6 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับไอออนคอปเปอร์ของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีค่าเท่ากับ 33.84, 37.32, 45.39 และ 38.81 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าความสามารถในการดูดซับไอออนเลดของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีค่าเท่ากับ 28.82, 33.78, 35.98 และ 35.29 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทวิตยภูมิของไอออนคอปเปอร์และเลดต่ำ จะเกิดดูดซับไอออนโลหะหนักต่ำ

ด้วย เนื่องจากเกิดการแข่งขันในการดูดซับโลหะหนักระหว่างโปรตอน ( $H^+$ ) กับ โลหะไอออนโลหะหนัก [26] นอกจากนี้การเกิดโปรโตเนต (Protonation) ของ Primary Amine และ Secondary Amine ที่มีอยู่ใน ของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN จะทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตของประจุบวกบนพื้นผิวแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีค่ามากขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับไอออนคอปเปอร์และเลดต่ำลงเมื่อพิจารณาค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิของไอออนคอปเปอร์ที่มีค่า pH 5 แนวโน้มของค่าความสามารถในการดูดซับไอออนคอปเปอร์ และเลด ของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีค่าลดลง เนื่องจากค่า pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 5.5 ไอออนไอออนคอปเปอร์ และเลด อาจเกิดการจับตัวกับไฮดรอกไซด์ซึ่งจะอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดการตกตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong, et al. [27] และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบปฐมภูมิและทุติยภูมิแสดงดังภาพที่ 4-9 และภาพที่ 4-10 พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบปฐมภูมิมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทุติยภูมิ ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักของไอออนคอปเปอร์ของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่ pH 3, 4, 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 36.33, 37.15, 36.89 และ 36.33 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าความสามารถ ในการดูดซับไอออนเลดของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีค่าเท่ากับ 35.70, 35.89, 32.82 และ 32.36 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากที่กล่าวมาในข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่าค่า pH ของการดูดซับไอออนของโลหะหนักในระบบปฐมภูมิ และทุติยภูมิ 2 ชนิด คือไอออนคอปเปอร์ และเลด จึงเลือกค่า pH ที่ 4 และ 5 ตามลำดับ เพื่อนำไปศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับค่า pH ของสารละลายโลหะหนักในระบบปฐมภูมิ

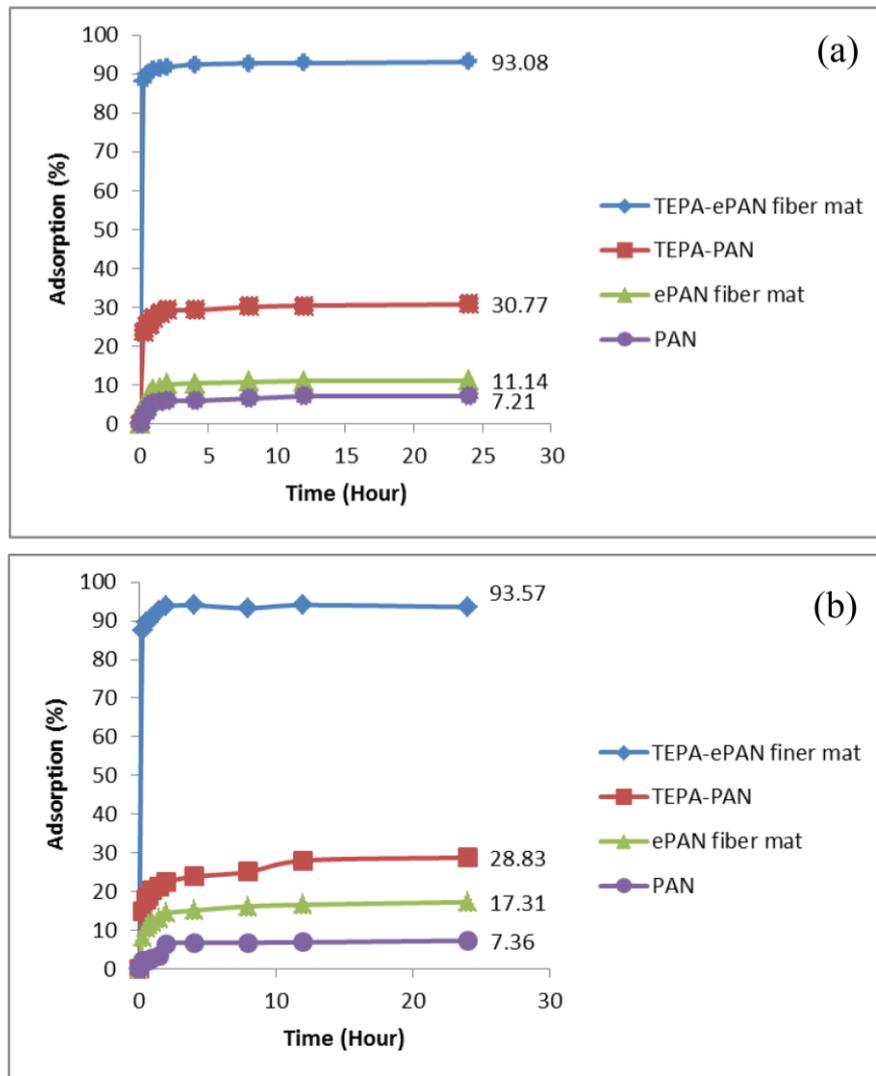


ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับค่า pH ของสารละลายโลหะหนักในระบบทุติยภูมิ

#### 4.3.2 ผลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก

ผลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิระหว่างไอออนคอปเปอร์และไอออนเลด แสดงดังภาพที่ 4-11 เมื่อพิจารณาเวลาในการดูดซับไอออนคอปเปอร์ความเข้มข้นของสารละลายของสารละลายไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 5 แสดงดังภาพที่ 4-11 (a) พบว่า การดูดซับไอออนของคอปเปอร์เมื่อเวลาเริ่มต้นจนถึง 5 ชั่วโมง แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN สามารถดูดซับไอออนของคอปเปอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่ผิวของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีหมู่เอมีนที่สามารถจับไอออนของคอปเปอร์มาก จึงสามารถดูดซับไอออนของคอปเปอร์ได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อหลังจาก 5 ชั่วโมงการดูดซับไอออนของคอปเปอร์จะเริ่มคงที่ เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ หลังจากนั้นความสามารถของการดูดซับไอออนของคอปเปอร์ลดลง แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวของแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ปกคลุมด้วยไอออนของคอปเปอร์ หากพิจารณาเปรียบเทียบการดูดซับไอออนของคอปเปอร์ของพอลิอะคริโลไนไตร์ (PAN) พอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี (TEPA-PAN) แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ที่เตรียมได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (ePAN) และแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี (TEPA-ePAN) พบว่า พอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี (TEPA-PAN) จะสามารถดูดซับไอออนของคอปเปอร์ได้มากกว่า ในทางเดียวกันแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (TEPA-ePAN) จะสามารถดูดซับไอออนของคอปเปอร์ได้มากกว่าแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์

เนื่องจากพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนแล้วจะมีหมู่เอมีนมาก จะสามารถดูดซับไอออนของคอปเปอร์ได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาการดูดซับไอออนของคอปเปอร์ โดยเปรียบเทียบการดูดซับไอออนของคอปเปอร์ระหว่างพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี (TEPA-PAN) กับ แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (TEPA-ePAN)



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับโลหะหนักในระบบพหุคูณกับเวลา การดูดซับโลหะหนักที่วัสดุดูดซับต่างๆ (a) คอปเปอร์ไอออนและ (b) เลดไอออน

พบว่า แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN เตรียมได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถดูดซับไอออนของคอปเปอร์มากกว่าพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี (TEPA-PAN) เนื่องจากแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่เตรียมได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต มีขนาดของเส้นใยอยู่ในระดับนาโนเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (TEPA-PAN) จะมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร (33 ไมโครเมตร) [28] แสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่า TEPA-PAN จึงทำให้พื้นที่ในการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นได้มากกว่า นอกจากนี้ผลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนเลด

แสดงดังภาพ 4-11 (b) ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับพฤติกรรมการดูดซับของไอออนคอปเปอร์ และเมื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักระบบทุติยภูมิและปฐมภูมิพบว่า มีแนวโน้มของการดูดซับไอออนโลหะหนักเช่นเดียวกัน

#### 4.3.3 ผลของไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนัก

ไอโซเทอมการดูดซับใช้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักกับ ไอออนโลหะหนักที่มีการดูดซับ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงกระบวนการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล [26] ไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ การดูดซับ แบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และการดูดซับแบบ ฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) เพื่อใช้ในการคำนวณการเข้าสู่สภาวะสมดุล และใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) สำหรับการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานคือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และการดูดซับพื้นที่ผิวเป็น แบบเนื้อเดียวกัน (Homogenous) สมการการดูดซับแบบ แลงเมียร์ [29] แสดงดังสมการที่ (4-1)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$q_m$  คือ ความสามารถในการดูดซับมากที่สุดแบบแลงเมียร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K_L$  คือ ค่าคงที่การดูดซับแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

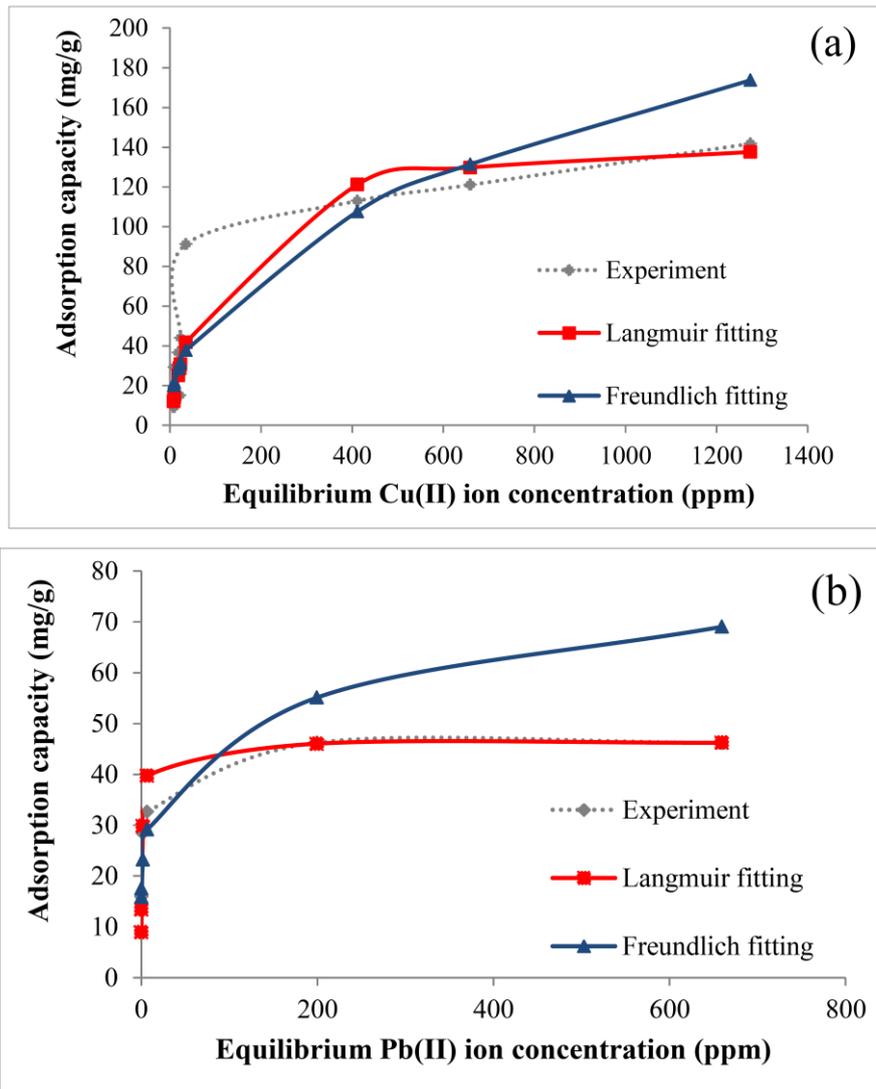
การดูดซับแบบฟรุนดิช มีสมมติฐานคือ พื้นที่ผิวของการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogenous) และเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น สมการการดูดซับแบบฟรุนดิช [31] แสดงดังสมการที่ (4-2)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4-2)$$

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อมิลลิกรัม) $^{1/n}$

$n$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ



ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในระบบทุติยภูมิกับความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ ที่สมดุล (a) คอปเปอร์ไอออน และ (b) เลดไอออน

สำหรับผลของไอโซเทอมการดูดซับไอออนโลหะหนักในระบบทุติยภูมิ โดยใช้แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN เป็นตัวดูดซับ เมื่อพิจารณาไอโซเทอมการดูดซับไอออนของไอออนโลหะหนักในระบบ คือ ไอออนคอปเปอร์ แสดงดังภาพที่ 4-12 (a) พบว่า เส้นกราฟของค่าความสามารถในการดูดซับแบบแลงเมียร์จะเข้าใกล้เส้นกราฟของค่าความสามารถในการดูดซับตามการทดลองมากกว่าค่าความสามารถในการดูดซับฟรุนดิช และหากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดิช แสดงดังตารางที่ 4-1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของการดูดซับแบบแลงเมียร์จะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของการดูดซับแบบฟรุนดิช จะแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมดูดซับระหว่างแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN กับไอออนของคอปเปอร์ จะมีพฤติกรรมดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งการดูดซับไอออนของคอปเปอร์การดูดซับแบบชั้นเดียว นอกจากนี้ผลของไอโซเทอมที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนของเลด ที่ส่งผลต่อการดูดซับไอออนของเลด แสดงดังตารางที่ 4-1 และภาพ 4-12 (b) มี

แนวโน้มเช่นเดียวกับการดูดซับของไอออนคอปเปอร์ โดยมีค่าสามารถในการดูดซับมากที่สุดแบบแลงเมียร์ของไอออนของคอปเปอร์ และเลด มีค่าเท่ากับ 147.06 และ 46.30 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จะเห็นว่าการดูดซับของไอออนคอปเปอร์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าไอออนเลด ทั้งนี้ถ้าพิจารณาทฤษฎี Hard and Soft Acids and Bases (HSAB) เป็นทฤษฎีที่อธิบายความเสถียรเชิงเปรียบของสารเชิงซ้อน และหลักการคือ Hard Acid จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกับ Hard Base และคือ Soft Acid จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกับ Soft Base เมื่อพิจารณาแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN ที่ทำหน้าที่เป็นคีเลตลิแกนด์ และมีหมู่เอมีนเป็นองค์ประกอบ อีกทั้งยังมีคู่อิเล็กตรอนอยู่เยอะ สามารถให้อิเล็กตรอนได้มาก จึงจัดเป็นประเภท Hard Base และเมื่อพิจารณาไอออนโลหะหนัก คือ ไอออนคอปเปอร์จะมีแรงดึงดูดระหว่างนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนมีค่ามากจึงทำให้อะตอมมีขนาดใหญ่กว่าไอออนเลด ทำให้ไอออนคอปเปอร์จัดเป็นประเภท Hard Base และไอออนเลดจัดเป็นประเภท Soft Base

**ตารางที่ 4-1** แสดงค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดิช ของการดูดซับไอออนของคอปเปอร์และเลดบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN

Metal ion	Langmuir model			Freundlich model		
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L mg/g)	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
Cu (II) ion	147.06	0.011	0.9836	8.385	2.359	0.708
Pb (II) ion	46.30	0.882	1	20.296	5.302	0.75

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

แผ่นเส้นใย TEPA-ePAN เตรียมได้จากการนำแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนตรที่ขึ้นรูปจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยากับอะมิโนเตตระเอทิลีนเพนตะเอมีนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบนพื้นผิวให้มีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะ จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของทองแดงและตะกั่วในระบบทุติยภูมิบนแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 5 และปริมาณของไอออนที่ถูกดูดซับบนแผ่นเส้นใย TEPA-ePAN เข้าสู่สมดุลที่เวลา 5 ชั่วโมง พฤติกรรมในการดูดซับของไอออนโลหะทั้งสองชนิดบนแผ่นเส้นใยเป็นไปตามทฤษฎีการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอออนทองแดง และตะกั่วได้เท่ากับ 147.06 mg/g และ 46.30 mg/g ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสนับสนุนการนำแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะการวิจัย

- 5.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะโดยใช้ระบบท่อและให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเส้นใย ซึ่งจะสามารถศึกษาปัจจัยของอัตราการไหลที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของวัสดุ
- 5.2.2 สามารถออกแบบการทดลองโดยเปลี่ยนระบบเป็นไอออนของโลหะชนิดอื่นๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์
- 5.2.3 สามารถศึกษาการนำไปใช้จริงได้โดยการนำไปประยุกต์ใช้ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะทองแดงและตะกั่วจากสารละลายตัวอย่างที่ได้จากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม

## บรรณานุกรม

- [1] V.J.P. Vilar, C.M.S. Botelho, R.A.R. Boaventura, Copper desorption from Gelidium algal biomass, *Water Res.* 41 (2007) 1569-1579.
- [2] M.E. Mahmoud, M.M. Osman, O.F. Hafez, E. Elmelegy, Removal and preconcentration of lead (II), copper (II), chromium (III) and iron (III) from wastewaters by surface developed alumina adsorbents with immobilized 1-nitroso-2-naphthol, *J. Hazard. Mater.* 173 (2010) 349-357.
- [3] A.A. Atia, A.M. Donia, A.M. Yousif, Removal of some hazardous heavy metals from aqueous solution using magnetic chelating resin with iminodiacetate functionality, *Sep. Purif. Technol.* 61 (2008) 348-357
- [4] B. Gong, Synthesis of polyacrylaminoimidazole chelating fiber and properties of concentration and separation of trace Au, Hg and Pd from samples, *Talanta* 57 (2002) 89-95.
- [5] P.A. Kavaklı, O. Güven, Removal of concentrated heavy metal ions from aqueous solutions using polymers with enriched amidoxime groups, *J. App. Polym. Sci.* 93 (2004)
- [6] S. Deng, R. Bai, Removal of trivalent and hexavalent chromium with aminated polyacrylonitrile fibers: performance and mechanisms, *Water Res.* 38 (2004) 2424-2432
- [7] D. Reneker, I. Chun, Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning, *Nanotechnology* 7 (1996) 216-223.
- [8] P. Kampalanonwat, P. Supaphol, Preparation of Hydrolyzed Electrospun Polyacrylonitrile Fiber Mats as Chelating Substrates: a Case Study on Copper(II) Ions, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2011) 11912-11921.
- [9] M.M. Bergshoef, G.J. Vancso, Transparent nanocomposites with ultrathin, electrospun Nylon-4,6 fiber reinforcement, *Adv. Mater.* 11 (1999) 1362-1365.
- [10] G.H. Kim, Electrospun PCL nanofibers with anisotropic mechanical properties as a biomedical scaffold, *Biomed. Mater.* 3 (2008) 025010.
- [11] E.R. Kenawy, G.L. Bowlin, K. Mansfield, J. Layman, D.G. Simpson, E.H. Sanders, G.E. Wnek, Release of tetracycline hydrochloride from electrospun poly(ethylene-co-vinylacetate), poly(lactic acid), and a blend, *J. Control Release* 81 (2002) 57-64.

- [12] K. Saeed, S. Haider, T. J. Oh, S.Y. Park, Preparation of amidoxime-modified polyacrylonitrile (PAN-oxime) nanofibers and their applications to metal ions adsorption, *J. Membrane Sci.* 322 (2008) 400-405.
- [13] P. Mat. Inter. 2 (2010) 3619-3627.
- [14] S. Ramakrisna, K. Fujihara, W. Teo, T. Lim, Z. Ma. 2005. An interduction to Electrospinning and Nanofibers. London. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [15] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์
- [16] ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับ. ครั้งที่ 1. โครงการตำราเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว: ลำดับ 6. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [17] McComb, M. E.; Gesser, H. D. Preparation of polyacryloamidoxime chelating cloth for the extraction of heavy metals from water, *J. Appl. Polym. Sci.* 1997, 65, 1175-1192.
- [18] Chang, X.; Yang, X.; Wei, X.; Wu, K. Efficiency and mechanism of new poly(acryl-phenylamidrazone phenylhydrazide) chelating fiber for adsorbing trace Ga, In, Bi, V and Ti from solution, *Anal. Chim. Acta.* 2001, 450, 231–238.
- [19] Deng, S.; Bai, R.; Chen, J. P. Aminated polyacrylonitrile fibers for lead and copper removal, *Langmuir.* 2003, 19, 5058-5064.
- [20] Ko, Y. G.; Choi, U. S.; Park, Y. S.; Woo, J. W. Fourier-transform infrared spectroscopy study of the effect of pH on anion and cation adsorption onto poly(acryloamidino diethylenediamine), *J. Polym. Sci. Pol. Chem.* 2004, 42, 2010–2018.
- [21] Sutasinpromprae, J.; Jitjaicham, S.; Nithitanakul, M.; Meechaisue, C.; Supaphol, P. Preparation and characterization of ultrafine electrospun polyacrylonitrile fibers and their subsequent pyrolysis to carbon fibers, *Polym Int.* 2006, 55, 825–833. 2006, 17, 2317-2329.
- [22] Li, S.; Chen, J.; Wu, W. Electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membranes for lipase immobilization, *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic.* 2007, 47, 117–124.
- [23] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.
- [24] Chen C. J. and Harrison I.R. “Modification of polyacrylonitrile (PAN) carbon fiber precursor via post-spinning plasticization and stretching in dimethyl formamide (DMF)” *Carbon.* 40 (2002) : 25–45.

- [25] Siti N. A. M. J., Rusli D. and Ishak A. "Redox Synthesis and Thermal Behavior of Acrylonitrile-Methyl Acrylate-Fumaronitrile Terpolymer as Precursor for Carbon Fiber." *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 6 (2012) : 416-420.
- [26] Musyoka S., et al. "Oxolane-2,5-dione modified electrospun cellulose nanofibers for heavy metals adsorption." *Journal of Hazardous Materials*. 192 (2011) : 922–927.
- [27] Yong R., et al. "Magnetic EDTA-modified chitosan/SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> adsorbent: Preparation, characterization, and application in heavy metal adsorption." *Chemical Engineering Journal*. 226 (2013) : 300–311.
- [28] Jie L., et al. "Continuous bundles of aligned electrospun polyacrylonitrile copolymer nanofibers prepared via the flowing water bath and their morphological structural and componential variations during the opposite-directional diffusion process." *Polymer*. 54 (2013) : 4987-4996.
- [29] Nianfang M., et al. "Preparation of amine group-containing chelating fiber for thorough removal of mercury ions." *Journal of Hazardous Materials*. 171 (2009) : 288–293.
- [30] Young G.K., et al. "Removal of Cu(II) and Cr(VI) ions from aqueous solution using chelating fiber packed column: Equilibrium and kinetic studies" *Journal of Hazardous Materials*. 194 (2011) : 92–99.

ประวัติคณะผู้วิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - สกุล ดร.พิมลพรรณ เนียมกลาง (กำพลานนท์วัฒน์)
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่  
ศาลายา ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170 โทรศัพท์ 02-889-  
4585-7 ต่อ 2696 โทรสาร 02-889-4585-7 ต่อ 2621  
E-mail address: pimolpun.kam@rmutr.ac.th

#### 4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิมการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน
2555	Ph.D.	Polymer Science	วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2549	B.Eng.	Petrochemical and Polymeric Material	มหาวิทยาลัยศิลปากร

#### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ นอกเหนือจากการศึกษา

Electrospinning, Surface Modification, Nanofibers, Chelating Material, Ultrathin-layer Chromatography

#### 6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย "ใส่ชื่อผลงานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมระบุปีที่ได้รับการสนับสนุน" หน่วยงานที่ให้ทุน/แหล่งทุน

##### 6.1 งานวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ

- หัวหน้าโครงการวิจัย : โครมาโตกราฟีแบบชั้นบางโดยใช้แผ่นเส้นใยนาโนพอลิอะคริลิกเอซิดเป็นวัสดุภาคคงที่ (จากแหล่งทุน สกว. ทุนสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่ ปี 2557)

##### 6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

- S. Jitjaicham<sup>\*</sup>, P. Kampalanonwat, P. Supaphol, (2013) "*Metal Adsorption Behavior of 2,4-Dinitrophenyl Hydrazine Modified Polyacrylonitrile*

*Nanofibers,*” eXPRESS Polymer Letters, 7(10), 832–841. (June) (ISI Impact Factor = 2.294)

- Kampalanonwat, P.; Supaphol, P.; Morlock, G.E. (2013) “*Electrospun nanofiber layers with incorporated photoluminescence indicator for chromatography and detection of UV-active compounds,*” Journal of Chromatography A, 1299, 110-117. (May) (ISI Impact Factor = 4.612)
- Kampalanonwat, P.; Supaphol, P. (2011) “*Preparation of Hydrolyzed Electrospun Polyacrylonitrile Fiber Mats as Chelating Substrates: a Case Study on Copper(II) Ions,*” Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(21), 11912-11921. (November) ((ISI Impact Factor = 2.206)
- Kampalanonwat, P.; Supaphol, P. (2010) “*Preparation and Adsorption Behavior of Aminated Electrospun Polyacrylonitrile Nanofiber Mats for Heavy Metal Ion Removal,*” ACS Applied Materials & Interfaces, 2(12), 3619–3627. (December) ((ISI Impact Factor = 5.008)

## ประวัติผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล ดร.ธีรินทร์ คงพันธุ์
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
พื้นที่ศาลายา ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170  
โทรศัพท์ 02-889-4585-7 ต่อ 2696 โทรสาร 02-889-4585-7  
ต่อ 2621 E-mail address: ampandamp@gmail.com

## 4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2552	Ph.D.	Material Science and Engineering	Nagasaki University	Japan
2549	M. Eng.	Materials and Molecular Engineering	Nagasaki University	Japan
2543	วท.บ.	ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	ไทย

## 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ นอกเหนือจากการศึกษา

Surface Modification, Corona treatment, Ultra filtration, Rubber Technology

## 6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย "ใส่ชื่อผลงานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมระบุปีที่ได้รับการสนับสนุน" หน่วยงานที่ให้ทุน/แหล่งทุน

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

1. Teerin Kongpun, Suguru Motokucho, Ken Kojio and Mutsuhisa Furukawa; *“Effect of Polymer Glycols on the Micro-aggregation Structure and Mechanical Properties of Spherulite Size Graded Polyurethane Elastomers”*, Journal of Applied Polymer Science, 113 (3), pp. 1454-1461 (2009)
2. Teerin Kongpun, Ken Kojio, and Mutsuhisa Furukawa; *“The Influence of Curing Temperature on Micro-aggregation Structure and Adhesion Properties of*

*Segmented Polyurethanes*”, Journal of The Adhesion Society of Japan, 44 (12), pp. 8-15 (2008)

3. Teerin Kongpun, Suguru Motokucho, Ken Kojio and Mutsuhisa Furukawa; “*Effect of the Ratio of Diol to Triol as Curing Agents on the Microaggregation Structure and Adhesion Properties of Segmented Polyurethanes*”, Journal of The Adhesion Society of Japan, 44 (9), pp. 1-8 (2008)

## ประวัติผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ – นามสกุล ดร.บวรกิตต์ เนคมานุรักษ์
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
พื้นที่ศาลายา ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170  
โทรศัพท์ 02-889-4585-7 ต่อ 2696 โทรสาร 02-889-4585-7  
ต่อ 2621 E-mail address: bawornkit.nek@rmutr.ac.th

### 4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2555	ปร.ด.	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ (หลักสูตรนานาชาติ)	มหาวิทยาลัยศิลปากร	ไทย
2550	วศ.ม.	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	ไทย
2548	วศ.บ.	ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	ไทย

### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ นอกเหนือจากการศึกษา

Nano composite, Bio-composite, Polymer recycle, Polymer processing

### 6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย "ใส่ชื่อผลงานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมระบุปีที่ได้รับการสนับสนุน" หน่วยงานที่ให้ทุน/แหล่งทุน

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

1. Bawornkit Nekhamanurak, Pajaera Patanathabutr and Nattakarn Hongsriphan. “*Surface modified CaCO<sub>3</sub> nanoparticles with silica via sol-gel process using in poly(lactic acid) nanocomposite.*” Advanced Materials Research Journal, Vols. 488-489, March 2012, pp. 520-524.

2. [B. Nekhamanurak](#), P. Patanathabutr and N. Hongsriphan. “*Mechanical Properties of Hydrophilicity Modified CaCO<sub>3</sub>-Poly(Lactic Acid) Nanocomposite.*” International Journal of Applied Physics and Mathematics, Vol. 2, No. 2, March 2012, pp. 98-103.
  
3. [B. Nekhamanurak](#), P. Patanathabutr and N. Hongsriphan. “*Thermal-mechanical property and fracture behavior of plasticized PLA-CaCO<sub>3</sub> nanocomposite.*” Plastics, Rubber and Composites, Vol. 41, Numbers 4-5, June 2012, pp. 175-179.