



## รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโลหะหนักด้วย  
แป้งโมดิไฟด์

(Modified Starch-enhanced Ultrafiltration for Heavy Metals  
Removal)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2563



## รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโลหะหนัก  
ด้วยแป้งโมดิไฟด์

(Modified Starch-enhanced Ultrafiltration for Heavy Metals  
Removal)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราชโซ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2563

## บทคัดย่อ

แบง์โมติฟายด์ หรือแบง์ดัดแปร เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างทางเคมี ที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ มีราคาถูก หาได้ง่าย รวมถึงสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย จึงถูกนำมาพัฒนาศึกษาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยแบง์โมติฟายด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม แบง์โมติฟายด์ที่ใช้ศึกษาชื่อว่า “แบง์แคทไอออน” โลหะหนักที่ศึกษาประกอบด้วย Cu (II) Ni (II) Pb (II) และ Cr (VI) โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นตามลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป เท่ากับ 0.13 0.0008 0.14 และ 0.75 นอร์มอลลิตี ตามลำดับ และมีค่าพีเอช 5.5 ทำการศึกษาด้วยชุดทดลองแบบกะ ประกอบด้วยการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส และปริมาณแบง์แคทไอออน ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแบง์แคทไอออนที่สภาวะสมดุลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาที ความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.41 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแบง์พบว่ แบง์แคทไอออน 0.1 กรัมสามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงสุดเท่ากับ 0.38 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม แบง์แคทไอออนสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้มากที่สุด รองลงมาคือ Pb (II) Cu (II) และ ไม่เกิดการดูดซับ Ni (II) ที่สารละลายพีเอช 5.5 เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของแบง์เป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ จึงเกิดการสร้างพันธะกับ Cr (VI) ที่อยู่ในรูป  $\text{HCrO}_4^-$  ในสารละลายพีเอช 5.5 เป็นส่วนใหญ่ และโลหะหนักประจุบวกสอง จะเกิดการสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันอื่น หรือหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีประจุเป็นกลางมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทำหน้าที่เป็นลิแกนด์สร้างพันธะกับไอออนของ Pb (II) Cu (II) และ Ni (II) ซึ่ง Pb (II) มีค่า electro-selectivity สูงกว่า Cu (II) และ Ni (II) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) มากกว่า Pb (II) มากกว่า Cu (II) และมากกว่า Ni (II) เท่ากับ 0.34 0.074 0.015 และ 0 ตามลำดับ แบบจำลองพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแบง์แคทไอออน สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order model) ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้นำระบบอัลตราฟิวเตรชันมาใช้ร่วมกับระบบดูดซับทางเคมีด้วยแบง์โมติฟายด์เพื่อประยุกต์ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบอัลตราฟิวเตรชันได้แก่ ค่าแรงดันเริ่มต้น เพอมีเอทพลักซ์ สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท

## Abstract

Modified powder or modified starch is a biopolymer with functional groups in the chemical structure. Heavy metals can be easily absorbed and easily digested. It was developed as a heavy metal absorbing material in water. The purpose of this study was to study the parameters that affect the adsorption efficiency of heavy metals by modified starch in synthetic wastewater. Modified starch used to studied is called "Cationic starch". Heavy metal were Cu (II) Ni (II) Pb (II) and Cr (VI) at initial concentrations were 0.13, 0.0008, 0.14 and 0.75 N, respectively and pH 5.5. Conducted a series of experiments in batch experiment include vary contact time and amount of modified starch. The uptake is rapid with maximum adsorption being observed within 10 minutes. The maximum adsorption capacity was 0.41 meq/g. Result of varying amount of modified starch found cationic starch 0.1 g can absorb the heavy metals up to 0.38 meq/g . The adsorption capacity of Cr (VI) onto cationic starch is bigger than other ions tested. Because, acidic condition amino functional group were positive charge and Cr (VI) mostly in form of  $\text{HCrO}_4^-$ . The selectivity sequence of the adsorption of these metals was  $\text{Pb (II)} > \text{Cu (II)} > \text{Ni(II)}$  because electro-selectivity  $\text{Pb (II)} > \text{Cu (II)} \approx \text{Ni(II)}$ . So The adsorption capacity of Cr (VI) was higher than Pb (II) and CU (II) and Ni (II) was 0.34 0.074 0.015 and 0 respectively. Adsorption process for heavy metal on cationic starch fit a Pseudo-second-order model. Also the operating conditions of modified starch enhanced ultrafiltration for heavy metal removal were evaluated in this study including of initial pressure, permeate flux and permeate to retentate ratio.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเงิน  
ทุนอุดหนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2559 เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันใน  
การกำจัดโลหะหนัก ด้วยแบงก์โมดิไฟด์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้การช่วยเหลือและสนับสนุน  
งานวิจัยทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ในที่นี้

พัชรินทร์ ราชโ

พฤษภาคม 2563



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2. วัตถุประสงค์	3
1.3. ขอบเขตโครงการวิจัย	3
1.4. ประโยชน์ของโครงการวิจัย	4
<b>บทที่ 2 บทนำ</b>	<b>5</b>
2.1. แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก	5
2.2. ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป	6
2.3. เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก	6
2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)	7
2.3.2 การก่อก้อนและการรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation)	8
2.3.3 การทำให้ลอย (Flotation)	8
2.3.4 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)	8
2.3.5 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Treatment)	9
2.3.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)	9
2.3.7 การดูดซับ (Adsorption)	10
2.3.8 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก	11
2.4. กระบวนการดูดซับ	12
2.4.1. กลไกการดูดซับ	12
2.4.2. ประเภทการดูดซับ	12
2.4.3. จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	13
2.4.4. สมดุลการดูดซับ	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5. วัสดุดูดซับต้นทุนต่ำ	18
2.5.1 วัสดุธรรมชาติ	19
2.5.2 วัสดุจากทางการเกษตร	19
2.5.3 วัสดุที่เป็นของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม	20
2.5.4 พอลิเมอร์ชีวภาพ	21
2.6. แป้งโมดิฟายด์	23
2.6.1 ชนิดแป้งโมดิฟายด์	23
2.6.2 ชื่อทางการค้าแป้งโมดิฟายด์	24
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษา</b>	<b>29</b>
3.1. แป้ง	29
3.2. อุปกรณ์และเครื่องมือ	29
3.3. สารเคมีและการเตรียมสารละลาย	29
3.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา	29
3.3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนัก	30
3.3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม	30
3.4. ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก	30
3.4.1 การแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส	31
3.4.2 การแปรเปลี่ยนปริมาณแป้ง	31
3.4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	32
3.5 การเดินระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน	32
3.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน	34
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>	<b>36</b>
4.1. ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	36
4.2. ผลกระทบของปริมาณแป้งแคทไอออนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	38
4.3. แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ	40
4.4. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกับวัสดุดูดซับอื่น ๆ	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การศึกษาศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชั่น	47
ร่วมกับการดูดซับด้วยแป้งโมดิฟายด์	
4.5.1 ผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น	47
4.5.2 การแปรผันแรงดันรีเทนเทท	48
4.5.3 การแปรผันสัดส่วนมวลของ Cr (VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์	49
<b>บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา</b>	<b>52</b>
5.1. สรุปผลการศึกษา	52
5.1.1 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส	52
5.1.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแป้ง	52
5.1.3 แป้งแคทไอออนสามารถดูดซับ	52
5.1.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนัก	52
5.1.5 ค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก	53
5.2 การศึกษาศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชั่น	53
ร่วมกับการดูดซับด้วยแป้งโมดิฟายด์	
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก	58
ภาคผนวก ข	78



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักจากกิจกรรมมนุษย์	6
ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป	7
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก	11
ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้ง	23
ตารางที่ 2.5 วิธีการผลิตแป้งดัดแปร	26
ตารางที่ 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก	30
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง	33
ตารางที่ 3.3 การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์	35
ตารางที่ 3.4 การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท	35
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์	42
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของ Pseudo-second-order model ของการดูดซับ Cr (VI), Pb (II) และ Cu (II)	45
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับอื่นๆ	46
ตารางที่ 4.4 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้งจากระบบอัลตราฟิลเตรชัน	51

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	15
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก	23
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ	24
รูปที่ 3.1 โครงสร้างโมเลกุลแป้งแคทไอออน	29
รูปที่ 3.2 การติดตั้งชุดทดลองระบบดูดซับร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน	33
รูปที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนที่ระยะเวลาต่างๆ	37
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนที่ระยะเวลาต่างๆ	37
รูปที่ 4.3 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแป้งแคทไอออนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	39
รูปที่ 4.4 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแป้งแคทไอออนต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก	39
รูปที่ 4.5 แบบจำลอง Pseudo-first-order ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน	41
รูปที่ 4.6 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน	41
รูปที่ 4.7 แบบจำลอง Intra-particle ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน	42
รูปที่ 4.8 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับ Cu (II) ด้วยแป้งแคทไอออน	43
รูปที่ 4.9 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับ Pb (II) ด้วยแป้งแคทไอออน	44
รูปที่ 4.10 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน	44
รูปที่ 4.11 ผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น	48
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อการกำจัดโครเมต	49
รูปที่ 4.13 ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์	49
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI)	50
รูปที่ 4.15 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์	51

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โลหะหนักถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตสแตนเลสคุณภาพสูง และเป็นส่วนผสมในสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง การชุบโลหะ การผลิตสีย้อม (Chrome dyes) ยาฆ่าเชื้อรา (Fungicides) และอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เป็นต้น (Aroua et al., 2007; Korus and Loska, 2009) โลหะหนักที่มีความเป็นพิษขึ้นกับเลขออกซิเดชัน (Oxidation stage) เช่น โครเมียมมีค่าเลขออกซิเดชันอยู่ระหว่าง Cr (III) ถึง Cr (VI) โดย Cr (VI) เป็นสารที่ละลายน้ำได้มีพิษรุนแรงมากกว่า Cr (III) เป็นสารก่อมะเร็ง และมีพิษต่อระบบทางเดินหายใจ ไต ผิวหนัง และปอด นอกจากมนุษย์แล้วยังเป็นพิษต่อแบคทีเรียและสัตว์ด้วย (Aroua et al., 2007; Baek et al., 2007; Dong et al., 2010) กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียในปัจจุบัน ได้แก่ การตกตะกอนเคมี (Chemical precipitation) อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นต้น (Kim et al., 2006; Ghosh et al., 2006; Cheng et al., 2009) โดยระบบตกตะกอนเคมีเป็นระบบที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักในปัจจุบันแต่การตกตะกอนมีหลายขั้นตอนคือต้องทำปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) หรือออกซิเดชัน (Oxidation) ร่วมกับการปรับพีเอช ให้เป็นกลางแล้วจึงทำการตกตะกอนทางเคมี ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้ในการเดินระบบสูง ส่วนกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น เเรซินมีราคาค่อนข้างสูง ต้องมีการฟื้นฟูสภาพของเรซินด้วยสารเคมี และตัวทำละลายก็เป็นสารเคมีซึ่งมีราคาสูงเช่นกัน (Kim et al., 2006; Yenphan et al., 2010) แม้ว่ากระบวนการทางกายภาพ เช่น การแยกด้วยเมมเบรนนั้น สามารถแยกไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำได้ดีแต่ต้องมีความละเอียดในการกรองในระดับนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) หรือออสโมซิสสัณกลับ (Reverse osmosis) ซึ่งใช้พลังงานในการเดินระบบสูงและมีค่าฟลักของการกรองต่ำ (Low permeate flux) (Kim et al., 2006)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นระบบกำจัดโลหะหนักซึ่งได้รับความนิยมค่อนข้างสูงในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง อีกทั้งสามารถแยกตะกอนเพื่อไปกำจัดในขั้นตอนต่อไปทำได้ง่าย หรือสามารถนำโลหะหนักบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ (Metal recovery) ด้วยการดีซอร์พชัน (Desorption solution) ออกจากสารดูดซับ (Bade et al., 2008; Connell et al., 2008; Pagana et al., 2008; Cheng et al., 2009) วัสดุดูดซับที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ไคโตรซาน แทนนินเจล และโพลีเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม แต่ถ่านกัมมันต์และตัวดูดซับอื่น เช่น แทนนิน

เจล โพลีเมอร์สังเคราะห์ และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant micellar solutions) มีราคาค่อนข้างสูงมากและนิยมใช้เพื่อดูดซับสารอินทรีย์มากกว่าโลหะหนัก (Baek et al., 2004; Kim et al., 2006; Connell et al., 2008) ส่วนการดูดซับโครเมียมด้วยโคโคโรซานนั้นปฏิกิริยาต้องเกิดขึ้นสองขั้นตอนและมีประสิทธิภาพดีเมื่อพีเอชประมาณ 2 แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 4-5 ประสิทธิภาพจะลดลงถึง 50% (Bulkaya and Cesur, 2008) ในปัจจุบันการพัฒนาวัสดุดูดซับเพื่อดูดซับโลหะหนักมุ่งเน้นที่การพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ราคาถูก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (Bohdziewicz, 2000; Baek et al., 2004; Baek et al., 2007; Klimaviciute et al., 2010) อีกทั้งกระบวนการดูดซับของวัสดุดูดซับที่นิยมใช้งานในปัจจุบันดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นการดูดซับด้วยกลไกทางกายภาพ ทำให้โลหะหนักสามารถหลุดออกได้เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกที่สูงกว่า เพื่อลดความเสี่ยงและลดผลกระทบเมื่อใช้กับน้ำเสียรวม การนำแบงโมดิฟายด์เป็นโพลีเมอร์จากธรรมชาติและมีหมู่ฟังก์ชันเกิดกระบวนการดูดซับทางเคมี มีราคาถูก และประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดี ในปัจจุบันมีการพัฒนาหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุล (Functional group) ของแบงโมดิฟายด์ในหลายรูปแบบทำให้มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพในการกำจัดโลหะหนักแตกต่างกัน (Chen et al., 2007; Cheng et al., 2009; Dong et al., 2010; Nichifor et al., 2010; Klimaviciute et al., 2010; Zamariotto et al., 2010)

ในการศึกษาของพัชรินทร์ ราโซ (2554) ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ 2554 ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของ Cr (VI) โดยกระบวนการดูดซับด้วยแบงโมดิฟายด์หรือแบงมันสำปะหลังดัดแปรพันธะทางเคมีชนิดอะมิโนโครอสลิงค์ (AMTS) เปรียบเทียบกับแบงมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปรพันธะทางเคมี ผลการศึกษาพบว่า AMTS มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแบงมันสำปะหลังที่ไม่มีการดัดแปรพันธะทางเคมี โดย AMTS มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr (VI) ได้ดีในสภาวะกรด (ค่า pH ที่เหมาะสม = 4.0) และพบแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพกำจัด Cr (VI) เกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่อยู่รอบๆ ผิววัสดุ (electrostatic) ซึ่งยืนยันได้จากการที่  $K_2Cr_2O_7$  มีการแตกตัวเป็น  $HCrO_4^-$  และ  $Cr_2O_7^{2-}$  ถึงร้อยละ 80 ในน้ำเมื่อ pH ของน้ำอยู่ในช่วง 0-5 และในการศึกษาขั้นต่อมาได้ทำการศึกษผลกระทบของความเข้มข้นของ Cr (VI) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับที่ค่า pH 4.0 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงจากร้อยละ 85 ถึง 50 เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของ Cr (VI) จาก 10 mg/L ถึง 50 mg/L แล้วจึงทำการศึกษาค่าคงที่ทางจลศาสตร์ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วย AMTS ที่ค่าความเข้มข้น Cr (VI) เริ่มต้นเท่ากับ 30 mg/L พบอัตราการดูดซับในช่วง 1 ชั่วโมงแรกประมาณ 83-90 mg/g และเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณวันที่ 5 โดยการศึกษาค่าคงที่ทางจลศาสตร์ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (pseudo-first-order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับที่ 2 เทียม (pseudo-second-order model) พบว่า pseudo-second-order model มีความเหมาะสมในการศึกษาค่าคงที่ทางจลศาสตร์ในการดูดซับ Cr (VI) ด้วย AMTS มากกว่า pseudo-first-order

model อีกรังยังทำการศึกษาสมดุลการดูดซับตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิชเพื่ออธิบายกลไกในการดูดซับที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ AMTS มีความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาข้างนี้ยังได้นำระบบอัลตราฟิวเตรชันมาใช้ร่วมกับระบบดูดซับทางเคมีด้วยแป้งโมดิฟายด์เพื่อประยุกต์ในการกำจัด Cr(VI) ในน้ำเสียโดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบอัลตราฟิวเตรชัน ได้แก่ ค่าแรงดันเริ่มต้น เพอมีเอทพลักซ์ สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์

แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาของ พัชรินทร์ ราโช (2554) ยังทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการและใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากสารละลาย  $K_2Cr_2O_7$  เท่านั้น จึงไม่พบอุปสรรคหรือด้วยปัจจัยต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงรวมถึงไอออนอื่นๆ หรือโลหะหนักอื่นๆ เจือปนอยู่ด้วยจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการนำเทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยแป้งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบระบบอัลตราฟิวเตรชันเพื่อบำบัดน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป (Printed circuit board assembly: PCBA) ซึ่งมีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ดีบุก และไอออนบวกหรือลบอื่นๆ ทั้งที่เป็นโลหะเป็นต้น และหาค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบดูดซับทางเคมีด้วยแป้งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบระบบอัลตราฟิวเตรชัน

## 1.2. วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับทางเคมีในการบำบัดน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูปด้วยแป้งโมดิฟายด์

1.2.2. เพื่อศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิวเตรชันและการดูดซับด้วยแป้งโมดิฟายด์ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป

## 1.3. ขอบเขตโครงการวิจัย

1.3.1. แป้งโมดิฟายด์สำหรับการศึกษาเป็นแป้งแคทไอออน ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในโครงสร้างโมเลกุล

1.3.2. น้ำเสียที่ใช้สำหรับการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม ที่มีโลหะหนักประกอบด้วย Cu (II) Ni (II) Pb (II) และ Cr (VI) ตามลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป

1.3.3. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยแอมติฟายด์ เป็นการศึกษาด้วยชุดทดลองแบบกะ ประกอบด้วยการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส และปริมาณแอมติฟายด์ในการดูดซับโลหะหนัก

#### 1.4. ประโยชน์ของโครงการวิจัย

1.4.1. สามารถพัฒนาแป้งมันสำปะหลังตัดแปรซึ่งเป็นวัสดุหาง่ายและมีราคาถูกเพื่อเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

1.4.2. โรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนที่น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสามารถนำผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

1.4.3. นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ เพื่อเผยแพร่กับนักวิชาการและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปพัฒนาและใช้ประโยชน์ต่อไป

1.4.4. การพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่จำนวน 1 คนหรือผู้ช่วยวิจัยซึ่งเป็นนักศึกษาในระดับปริญญาโทหรือเอกอย่างน้อย 1 คน

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนัก

การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำมาจาก 2 แหล่งที่สำคัญ คือ จากธรรมชาติ และจากมนุษย์ การปนเปื้อนจากธรรมชาติเกิดจากการเคลื่อนที่ของสารโลหะหนักจากแม่น้ำ เนื่องจากการผุพังตามธรรมชาติหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือการเกิดฝนกรดชะละลายแร่โลหะ และการเคลื่อนที่ของสารโลหะหนักจากชั้นบรรยากาศในรูปฝุ่นละออง ซึ่งเมื่อน้ำฝนไหลผ่านจะชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ การปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ปุ๋ย และสารกำจัดศัตรูพืชในการเกษตร การทำเหมืองแร่ โรงงานอุตสาหกรรม จากชุมชน และการรั่วซึมจากพื้นที่ฝังกลบขยะ อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนโลหะหนักจากธรรมชาติไม่ก่อเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาก ส่วนมากการปนเปื้อนโลหะหนักที่ก่อเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากคือ การปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรม ใช้ในการผลิตพลาสติก สี แบตเตอรี่ ด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยากำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง และปุ๋ย ทาง การแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดการถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร สะสมในสิ่งมีชีวิต และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้ (O'Connell, Birkinshaw, and O'Dwyer 2008; (Srivastava and Majumder, 2008) การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น ชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียแตกต่างกันออกไปตามแต่ละกิจกรรมหรืออุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 อุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักโดยหลัก ได้แก่ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมแผ่นวงจร อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมผลิตสี เป็นต้น โลหะหนักที่พบการปนเปื้อนในน้ำ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท และสารหนู เป็นต้น การทำเหมืองแร่เป็นอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำ เนื่องจากการระบายโลหะหนักออกจากเหมืองแร่ เกิดขึ้นเมื่อน้ำเกิดสภาวะเป็นกรดจากแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนเปลี่ยนซัลไฟต์ให้เป็นกรดซัลฟูริก เมื่อน้ำซึมลงในเหมืองก็จะละลายโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น ให้เป็นสารละลายไหลไปตามแม่น้ำบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำยังมีแหล่งกำเนิดจากหลุมฝังกลบขยะ โดยน้ำชะขยะที่ไหลจากหลุมขยะ หรือกองขยะจะไหลลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ส่งผลกระทบต่อการใช้น้ำอุปโภคบริโภค โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท และสารหนู เป็นต้น

## ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษโลหะหนักจากกิจกรรมมนุษย์

แหล่งกำเนิด	โลหะหนัก
อุตสาหกรรมเหมืองแร่	Pb, Cd, As, Cr, Co, Zn, Cu
อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ย และสารกำจัดศัตรูพืช	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	Cr, Ni, Zn, Cu
อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg
อุตสาหกรรมการผลิตสี	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn
อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจร	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn
หลุมฝังกลบขยะ	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg

หมายเหตุ จาก O'Connell et al. (2008)

### 2.2. ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป

แผ่นวงจรสำเร็จรูป เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด ซึ่งป็นแผ่นที่มีทางเดินของวงจรไฟฟ้าที่สมบูรณ์เตรียมพร้อมสำหรับการต่อเข้ากับชิ้นส่วนไฟฟ้า เมื่อปริมาณการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลให้ปริมาณการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูปมากขึ้นตามด้วย ปัญหาสำคัญที่ตามมาจากกระบวนการผลิตคือ น้ำเสีย ในขั้นตอนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป ประกอบด้วยขั้นตอนการชุบโลหะ ทำให้มีน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่เป็นปัญหาสำคัญทางด้านสิ่งแวดล้อม จากตารางที่ 2.2 เป็นผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป โลหะหนักที่ปนเปื้อนพบทั่วไปประกอบด้วย Cu (II) Pb (II) Ni (II) และ Cr (VI) เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนัก ความเข้มข้นโลหะหนักที่ปนเปื้อนเหล่านี้มีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นน้ำเสียเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านการบำบัดโดยการกำจัดโลหะหนักก่อนปล่อยออกภายนอกโรงงาน

### 2.3. เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

ปัจจุบันการกำจัดโลหะหนักที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม มีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การก่อก้อนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (Membrane separation) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้



## ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป

Heavy metal	Li-Yang Chang, (2001)	Geric et al., (2017)	Thomas, Biatecka, Zdebik et al., (2017)	Lou et al., (2009)
Cu (II)	6-94	19.33	70.80	524
Ni (II)	0.5-5.8	0.027	1.10	
Pb (II)	0.02-38	0.014		
Cr (VI)	5.0-25	0.02		
Cd (II)				
Fe		50.142		
As		0.021		
Hg				
Tin			20.9	
Zn		0.063		

### 2.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมี เป็นกระบวนการเติมสารเคมีลงในน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนสภาพของสารมลพิษต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (Soluble) ให้เปลี่ยนเป็นตะกอนผลึกที่อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble) ทำให้สามารถแยกสารมลพิษดังกล่าวออกจากน้ำเสียได้ การตกตะกอนทางเคมีเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักของน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นแล้วถือว่าเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากในการดำเนินการและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ประสิทธิภาพของการกำจัดขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยทั่วไปการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 แบบ คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ คือการเติมปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการจับตัวระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำ วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพกำจัดโลหะหนักที่ดีในช่วงพีเอช 8-11 และถ้าน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ละลายกลับคืนได้ซึ่งเป็นข้อเสียของการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนซัลไฟด์ สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ข้อดีคือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อจำกัดในเรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

(Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

### 2.3.2 การก่อดตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation)

กระบวนการก่อดตะกอนและรวมตะกอนเป็นการเติมสารเคมี (coagulant) ลงไปในน้ำเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์เหล่านั้นสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนลงได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไประบบจะประกอบไปด้วยถังกวนเร็วและถังกวนช้า ถังกวนเร็วมีหน้าที่กวนผสมให้สารโคแอกกูแลนต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ส่วนถังกวนช้ามีหน้าที่ทำให้ตะกอนเคลื่อนที่มาสัมผัสกันเพื่อรวมตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งการก่อดตะกอนและรวมตะกอนยังต้องอาศัยการทำงานร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีโดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นด่างเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง ถือเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้ที่ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้หมด จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นอย่างการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย (Chang and Wang, 2007) รวมถึงข้อเสียในเรื่องของปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นหลังการบำบัดทำให้ค่าใช้จ่ายในเรื่องของการกำจัดกากตะกอนเพื่อลดความเป็นพิษกากตะกอนเหล่านั้น ก่อนที่จะปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

### 2.3.3 การทำให้ลอย (Flotation)

กระบวนการทำให้ลอยถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียที่มีไขมัน หลักการคือ จะแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยากรวมถึงโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยฟองอากาศ ระบบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Dissolved air flotation (DAF) (Fu and Wang, 2011) กระบวนการลอยตัวของโลหะหนักเริ่มจากการเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียโดยใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และตามด้วยการเป่าฟองอากาศเพื่อแยกโลหะหนักเหล่านั้นออก ในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่เป็นสารดักจับ สารช่วยตกตะกอน จึงเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก และต้องใช้พลังงานในการเป่าอากาศ อาจทำให้ไม่คุ้มค่ากับการใช้งานบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม

### 2.3.4 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว ซึ่งได้รับความสนใจมากในการใช้บำบัดน้ำที่มีสารอินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงมาก นอกจากความสามารถในการกำจัดของแข็ง และสารประกอบอินทรีย์แล้ว ยังรวมถึงการกำจัดโลหะหนักต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของเมมเบรนที่สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ ได้แก่ อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) และรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) ซึ่งได้รับความสนใจทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอยู่มากมาย

ก) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนใช้สำหรับแยก โลหะหนัก สารโมเลกุลขนาดใหญ่ และของแข็งแขวนลอย ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500 ออกจากน้ำ ส่วนสารอื่นรวมถึงโลหะหนักที่ละลายน้ำ หรือมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 จะสามารถหลุดผ่านเมมเบรนปนเปื้อนออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด ดังนั้นในการใช้งานในการกำจัดโลหะหนักจึงมีการเพิ่มการเติมสารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเมมเบรน (micellar enhanced ultrafiltration, MEUF) และการเติมพอลิเมอร์ในกระบวนการเมมเบรน (polymer enhanced ultrafiltration, PEUF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย MEUF และ PEUF จึงขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย (Fu and Wang et al., 2011) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนัก เป็นวัตถุดิบในการผลิต จะมีโลหะหนักปนเปื้อนมากับน้ำเสียอยู่หลากหลายชนิด ทำให้การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสมมีความยุ่งยาก หรืออาจต้องใช้หลายชนิดตามชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อน

ข) รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ใช้แรงดันในการแยกสารต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยกสารอินทรีย์ได้ทุกชนิด และแยกสารอนินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสูง โดยประสิทธิภาพของ RO ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ (Ujang and Anderson, 1996) กระบวนการ RO ไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบสูง ซึ่งไม่คุ้มค่ากับการลงทุนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการน้ำที่ผ่านการบำบัดที่สะอาดมากนัก

ค) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) กระบวนการนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายออกจากน้ำ เทคโนโลยีนาโนฟิลเตรชันถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจำพวกทองแดง นิกเกิล โครเมียม และสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (Wahab Mohammad, Othaman, and Hilal, 2004) มีข้อดีคือ สามารถใช้งานในช่วงค่าพีเอช ได้กว้างตั้งแต่ 3-8 และใช้แรงดันน้อยกว่ารีเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้เมมเบรนยังไม่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง

### 2.3.5. การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Treatment)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีการนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก และมีราคาค่าก่อสร้างสูง

### 2.3.6. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกจับโดยสารแลกเปลี่ยนไอออน หรือเรซิน (Resin)

ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคตไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation Exchange) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion Exchange) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด เรซินธรรมชาติ และเรซินสังเคราะห์มีความสามารถเฉพาะในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย โดยจะนิยมใช้เรซินสังเคราะห์มากกว่าเรซินธรรมชาติ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า (Alyüz and Veli, 2009) เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งานคือ คลินออปติโลไลท์ (Clinoptilolite) และซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรดอ่อน ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกจับอยู่กับไฮโดรเจนไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะหนักไฮโดรเจนไอออนจะหลุดออกถูกแทนที่ด้วยโลหะหนักประจุบวก เรซินสังเคราะห์ที่มีใช้งานมีหลายชนิดด้วยกัน โดยส่วนมากแล้วเป็นเรซินแบบกรดแก่มีหมู่ซัลโฟนิค (Sulfonates functionality) และใช้เรซินแบบกรดแก่ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออน โพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ และหมู่อิมิโนไดอะซีเตต เป็นต้น การแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย (Kurniawan et al. 2006) อีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจำเป็นต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิกิริยา

### 2.3.7. การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารมาสะสม ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิว โดยให้สารละลายที่มีสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นวัสดุดูดซับ (Adsorbent) องค์ประกอบของสารละลายแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับวัสดุดูดซับได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และรูพรุนของวัสดุดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ และความสามารถของสารที่ถูกดูดซับที่มีต่อวัสดุดูดซับ

การดูดซับเป็นอีกหนึ่งระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง มีความยืดหยุ่นในการออกแบบและการควบคุมระบบ ขั้นตอนในการบำบัดไม่ซับซ้อน ควบคุมระบบง่ายกว่าระบบตกตะกอนทางเคมี และยังสามารถนำวัสดุดูดซับ (adsorbents) กลับมาใช้ใหม่ได้โดยกระบวนการดีซอร์พชัน (desorption process) เป็นการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ ทำให้ง่ายต่อการกำจัดสารมลพิษในขั้นตอนต่อไป หรือสามารถนำโลหะบางตัวที่หลุดออกจากวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ (metal recovery) (Crini, 2005; Fu and Wang, 2011; O'Connell et al. 2008) ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับที่ใช้

### 2.3.8. การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

เทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนักที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ในแต่ละวิธีมีกระบวนการควบคุมระบบที่แตกต่างกัน ทำให้มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป ดังสรุปในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ข้อดี - ข้อเสียของเทคโนโลยีการกำจัดโลหะหนัก

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนทางเคมี	ควบคุมระบบง่าย และราคาค่าก่อสร้างต่ำ	เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด กากตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง
การก่อก้อนและรวมตะกอน	ตกตะกอนเร็ว และรีดน้ำออกได้ง่าย	เกิดตะกอนมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัด กากตะกอน ค่าบำรุงรักษาสูง
การทำให้ลอย	ระยะเวลาเก็บกักน้อย กำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้	ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าควบคุมระบบสูง
การแยกด้วยเมมเบรน	เกิดตะกอนน้อย ใช้สารเคมีน้อย ใช้พื้นที่น้อย	ราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าควบคุมระบบสูง
การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี	ไม่ต้องใช้สารเคมี	สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า
การแลกเปลี่ยนไอออน	ทนต่อสภาวะกรด หรือด่าง สามารถฟื้นฟูเรซินกลับมาใช้ ใหม่ได้สูง	ค่าก่อสร้าง และบำรุงรักษาสูง
การดูดซับ	ประสิทธิภาพสูง จลนพลศาสตร์เร็ว	ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับ

หมายเหตุ จาก O'Connell et al. (2008)

## 2.4 กระบวนการดูดซับ

### 2.4.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า วัสดุดูดซับ (Adsorbent) การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง และ ของเหลวกับของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลวกับของแข็ง (Liquid – Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของวัสดุดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับวัสดุดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

### 2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

ชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

ก. การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีคือสามารถฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

ข. การดูดซับทางเคมี เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของวัสดุดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างวัสดุดูดซับกับสารถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่า

การดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดได้จากกระบวนการดูดซับทางเคมี (adsorption) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) การประสาน (coordination) การคีเลตชัน (chelation) และการแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) เป็นต้น เช่นจากผลการศึกษาของ Meng, Wang, Xu, and Li (2012) การดูดซับ Pb (II) ด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และอะมิโน กลไกการดูดซับเป็นกระบวนการทางเคมี เนื่องจากเกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (การคีเลต) ระหว่างอะตอมไนโตรเจนของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและไอออนของ Pb (II)

#### 2.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบ ๆ วัสดุดูดซับ และการแพร่ในโพรงวัสดุดูดซับไปยังพื้นผิววัสดุดูดซับ ตามลำดับ ขั้นตอนการแพร่ขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดจลนพลศาสตร์ หรืออัตราการดูดซับของระบบดูดซับนั้น ๆ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order model) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order model) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของวัสดุดูดซับ และในส่วนของ การอธิบายขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน จะใช้สมการการแพร่ภายในรูพรุนอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ (intraparticle diffusion)

ก. สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จากสมมติฐานการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุดูดซับกับโมเลกุลสารถูกดูดซับ และการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.1)$$

โดยที่  $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที่<sup>-1</sup>)

$q_t$  คือ ค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (mg/g)

$q_e$  คือ ค่าการดูดซับของวัสดุดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.1) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้สมการที่จัดอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.2)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-k_1/2.303$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$

ข. สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีสมมุติฐานว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สามารถเขียนอัตราการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

โดยที่  $k_2$  คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (นาที่<sup>-1</sup>)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.3) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้สมการที่จัดอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_t$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $1/q_e$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_2 q_e^2$

ค. การแพร่ภายในรูพรุน จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย สมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย ซึ่งสมการของ Weber และ Moriss สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_i t^{0.5} + C \quad (2.5)$$

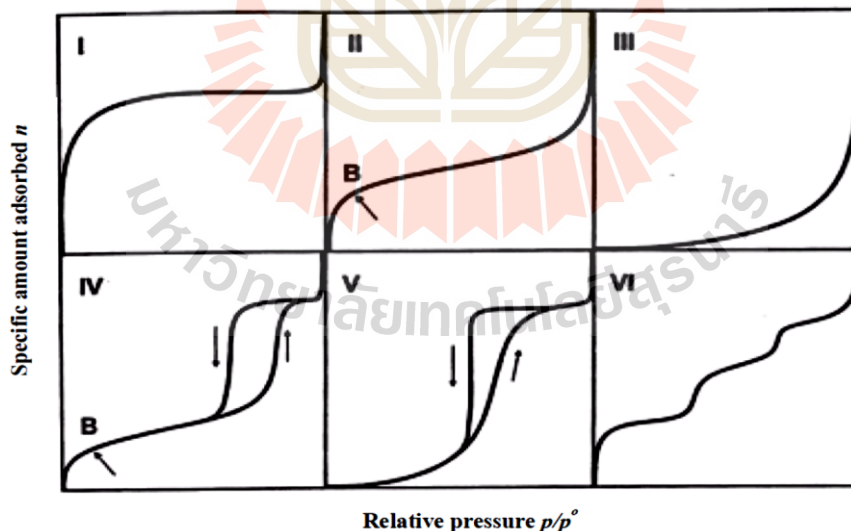
โดยที่  $k_i$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{0.5}$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $k_i$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า  $C$  มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก



#### 2.4.4 สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ บนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของสารที่ถูกดูดซับ ระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิววัสดุดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สอง ก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น ไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ปัจจุบันไอโซเทอร์มการดูดซับของ IUPAC มี 6 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

หมายเหตุ จาก Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Application (19), โดย F., Rouquerol, J., Rouquerol, Sing, 1999, London: Academic Press.

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or Knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกั่ว ไอโซ-เทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีความพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างวัสดุดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

สมการไอโซเทอร์ม ใช้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ สมดุลกับจำนวนของสารถูกดูดซับ ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ สมการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich)

1. สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมุติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ แต่ละโมเลกุลของวัสดุดูดซับเกิดการดูดซับ บนผิวแบบชั้นเดียว และโมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับ โมเลกุลที่อยู่ติดกันได้ สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถ นำมาใช้งานได้ในช่วงกว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจาก ระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของ วัสดุดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของวัสดุดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า หรือค่าการดูดซับที่สมดุล

$q_{\max}$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว

$K_L$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ (2.6) จัดให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  จะสามารถใช้สมการเส้นตรงคำนวณหาค่า  $q_{\max}$  และ  $K_L$  ได้ จากจุดตัดแกน  $y$  และความชัน สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการ แยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ (2.8)

$$R_L = \frac{1}{1 + (1 + K_L C_0)} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซ เทอม ว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับ เป็น เส้นตรง (linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

2. สมการการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich's isotherm) เป็นแบบจำลองเส้น โค้งสมดุลการดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่สามารถประยุกต์ใช้กับสมดุลการดูดซับสารถูกดูดซับใน ของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือลักษณะโค้งหงาย ซึ่งมีสมมุติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุ

ดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด การดูดซับเกิดแบบหลายชั้น สมการฟรุนดิชเขียนได้ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.9)$$

โดย  $q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

$K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช (mg/g)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

$n$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

สามารถจัดสมการ (2.5) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่ความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ  $\log K_F$  จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า  $n$  น้อยแสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า  $1/n$  มากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

## 2.5. วัสดุดูดซับต้นทุนต่ำ

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุดูดซับเพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำมุ่งเน้นที่การพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก วัสดุมีราคาถูก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (Bohdziewicz, 2000; Baek et al., 2004; Baek et al., 2007; Klimaviciute et al., 2010) เช่น วัสดุจากธรรมชาติ วัสดุจากทางการเกษตร วัสดุที่เป็นของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม และพอลิเมอร์ชีวภาพ อย่างไรก็ตามวัสดุเหล่านี้สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ด้วยวิธีการดัดแปรพันธะทางเคมี ให้โครงสร้างของวัสดุดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับไอออนโลหะหนักได้มากขึ้น เช่น วัสดุธรรมชาติดัดแปรพันธะเคมี พอลิเมอร์ชีวภาพดัดแปรพันธะเคมี และเส้นใยดัดแปรพันธะเคมี ทำให้วัสดุดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแตกต่างกัน

### 2.5.1 วัสดุธรรมชาติ

วัสดุธรรมชาติที่สามารถใช้ในการดูดซับโลหะหนักได้ประกอบด้วย ดินเหนียว (Clay) และ ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Zeolite) หรือที่เรียกว่า คลินออปติโลไลต์ (Clinoptilolite) วัสดุเหล่านี้มีอยู่ในธรรมชาติ หาได้ง่ายพบได้ทั้งในน้ำและบนพื้นดิน มีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง และที่สำคัญองค์ประกอบภายในวัสดุเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับโลหะหนัก ที่สามารถดูดซับได้ทั้งไอออนประจุบวก และประจุลบ รวมถึงยังสามารถเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนได้

ปกติดินเหนียวมีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนสู่ดิน หรือธรรมชาติ ด้วยกลไกการดูดซับหรือแลกเปลี่ยนไอออนหรือทั้งสองกลไกของไอออนประจุบวก และไอออนประจุลบที่เป็นองค์ประกอบภายในของดินเหนียว ไอออนเหล่านั้นสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนอื่น ๆ ได้ง่าย และไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของดินเหนียว ไอออนที่เป็นองค์ประกอบภายในดินเหนียวได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โปรตอน โพแทสเซียม แอมโมเนียม โซเดียม ซัลเฟต คลอไรด์ ฟอสเฟต และไนเตรต (Sen Gupta and Bhattacharyya, 2008) สำหรับซีโอไลต์ธรรมชาติ หรือ คลินออปติโลไลต์ คือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) โครงสร้างของคลินออปติโลไลต์มีไอออนประจุบวก เช่น โซเดียม แคลเซียม และโพแทสเซียม เป็นองค์ประกอบจึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนประจุบวกในน้ำหรือสารละลายได้เช่นเดียวกับดินเหนียว (Bektas and Kara, 2004) จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้มีการนำวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในงานด้านการกำจัดโลหะหนัก

### 2.5.2 วัสดุจากทางการเกษตร

ของเสียจากภาคเกษตรกรรม ถือเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูก มีมูลค่าทางเศรษฐกิจน้อย และมีแหล่งกำเนิดมากมาย การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักเนื่องจากสามารถดูดซับได้ดี กระบวนการเตรียมวัสดุไม่ยุ่งยาก และง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Abdel Salam, Reiad, and ElShafei, 2011; Barakat, 2011) การศึกษาที่ผ่านมาจึงมีการนำส่วนของพืช เช่น แกลบ ผล เมล็ด เปลือก ลำต้น และใบของพืชชนิดต่าง ๆ ใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก ในเซลล์ของพืชมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ แทนนิน (Tannin) ลิกนิน (Lignin) และเซลลูโลส (Cellulose) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล และเอมีน ทำให้เกิดกระบวนการดูดซับ (Jain, Garg, and Kadirvelu, 2010)

Lasheen, Ammar, and Ibrahim (2012) ใช้เปลือกส้มเป็นวัสดุดูดซับ Cd (II) Cu (II) และ Pb (II) โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างเปลือกส้มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไนตริกกับเปลือกส้มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าความสามารถในการดูดซับ Cd (II) ด้วยเปลือกส้มที่ผ่านการปรับสภาพสูงกว่าเปลือกส้มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ความสามารถในการดูดซับ Cd (II) Cu (II) และ Pb (II) ของเปลือกส้มที่ปรับสภาพ เท่ากับ 13.70 15.27 และ 73.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ค่าพีเอช 5 สารละลายในสภาวะดังกล่าวโลหะหนักอยู่ในรูป  $M^{2+}$   $M(OH)^+$  และ

$M(OH)_2$  สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับประจุไฮโดรเจนบนพื้นผิวของเปลือกส้มได้ แต่จากการศึกษาของ [Chih-Huang Wenga et al. \(2014\)](#) พบว่าความสามารถในการดูดซับ  $Cu(II)$  ด้วยใบชาดำที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 43.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าผลการศึกษาของ [Lasheen et al. \(2012\)](#) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารละลายต่างสามารถกำจัดแทนนินในเซลล์พืชได้ดีกว่าสารละลายกรด ทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนผิววัสดุดูดซับมีมากกว่า และเกิดการดูดซับได้มากกว่า อย่างไรก็ตามการปรับสภาพพื้นผิววัสดุดูดซับอาจไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้นได้เสมอไป อาจขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วย ดังเช่นผลการศึกษาของ [ซึ่งใช้ช่อดอกและก้านดอกทานตะวันเป็นวัสดุดูดซับ  \$Cr\(VI\)\$](#)  โดยทำการปรับสภาพวัสดุด้วยกรดไนตริกก่อนพบว่าความสามารถในการดูดซับ  $Cr(VI)$  เท่ากับ 53.76 และ 56.49 สำหรับช่อดอกและก้านดอกทานตะวัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ [Moussavi and Barikbin \(2010\)](#) ใช้เปลือกถั่วพิชตาชิโอที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเป็นวัสดุดูดซับ  $Cr(VI)$  ที่ค่าพีเอช 2 เช่นกันความสามารถในการดูดซับสูงถึง 116.30 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยทั้ง 2 การศึกษาดังกล่าวไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์เช่นเดียวกัน ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเพียงชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางเคมี สารละลายที่มีค่าพีเอช 2  $Cr(VI)$  จะอยู่ในรูป กรดโครเมท ( $HCrO_4^-$ ) เป็นส่วนใหญ่ และพื้นที่ผิววัสดุดูดซับเป็นประจุบวก จึงสามารถดูดซับ  $Cr(VI)$  ได้มาก สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [Anandkumar and Mandal \(2009\)](#) นำเมล็ดมะตูมปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อให้เกิดหมู่ฟอสเฟตในผิวของเมล็ดมะตูม และศึกษาความสามารถในการดูดซับ  $Cr(VI)$  ในสารละลาย ที่ค่าพีเอช 2 ความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 17.27 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องทั้งแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว แต่ลักษณะของตำแหน่งการดูดซับมีความแตกต่างกัน และไม่เป็นระเบียบ

### 2.5.3 วัสดุที่เป็นของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม

ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักที่มีราคาถูก และสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี วัสดุที่นำมาศึกษาพัฒนามีหลากหลายชนิด เช่น ถ่านหิน (Fly ash) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) โคลนแดง (Red mud) น้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (Black liquor) เป็นต้น แนวโน้มการพัฒนาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุเหล่านี้ทำได้โดยการปรับปรุงสภาพของวัสดุด้วยวิธีทางเคมี กลไกการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับจากของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมค่อนข้างซับซ้อน แต่กลไกหลักประกอบด้วย การเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) การแลกเปลี่ยนไอออน พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมโลหะหนักกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุ จากการศึกษาของ [Smiciklas et al. \(2014\)](#) พบว่าเมื่อนำโคลนแดงมาผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยกรดไฮโดรคลอริกใช้เป็นวัสดุดูดซับนิกเกิล วัสดุดูดซับนี้มีความสามารถในการดูดซับ  $Ni(II)$  เท่ากับ 11.11 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นการดูดซับทางเคมี และเกิดการดูด

ซับเพียงชั้นเดียว เนื่องจากผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ [Sahu et al. \(2013\)](#) พบว่าโคลนแดงที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยกรด ไฮโดรคลอริกสามารถดูดซับ Pb (II) ได้ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยพื้นที่ผิวของวัสดุจะมี ประจุไฮโดรเจนล้อมรอบอยู่ จึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนกับไอออนของตะกั่ว ไอโซ เทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นการดูดซับทาง เคมี โดยเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) สูงสุดโดยโคลนแดงมีค่าเท่ากับ 6.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 4 นอกจากนี้ยังระบุว่ากระบวนการดูดซับของวัสดุดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับประจุรอบพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมากกว่าพื้นที่ผิวสัมผัส สอดคล้องกับผลการศึกษา ของ [Hsu et al. \(2008\)](#) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ด้วยซีเมนต์ลอยทั้งที่ไม่ ผ่านกระบวนการปรับปรุงใด ๆ และผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนและสารละลายโซเดียมไฮ ดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอช 5 ซีเมนต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใด ๆ มีความสามารถในการดูดซับ Pb (II) ได้มากที่สุด เท่ากับ 178.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนมี ความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 126.4 มิลลิกรัมต่อกรัม และซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถดูดซับ Cu (II) ได้น้อยสุด 76.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากการดูดซับ โลหะหนักของวัสดุดังกล่าวนี้ไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของพื้นที่ผิว โดยที่ ผิวของซีเมนต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะมีประจุไฮโดรเจนล้อมรอบมากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออน ระหว่างไฮโดรเจนกับไอออน Cu (II) จึงเกิดได้มากกว่า ดังนั้นความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจึง มากกว่า นอกจากนี้ [Shyam et al. \(2013\)](#) ยังได้ทำการศึกษาดูดซับโลหะหนักด้วยซีเมนต์ที่ผ่าน กระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายฟอสเฟต โดยฟอสเฟตที่เติมลงจะสร้างพันธะกับ โซเดียม โปแทสเซียม และ แคลเซียม ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ และประจุดังกล่าวจะเป็นตัว แลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของ Ni (II) และ Pb (II) สำหรับการดูดซับ Cr (VI) จะเกิดแรงดึงดูดทาง ไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างฟอสเฟตกับ Cr (VI) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูด ซับดังกล่าวนี้ยังคงต่ำเมื่อเทียบกับผลการศึกษานอื่นที่ใช้ของเสียหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จาก ภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับเช่นกัน โดยความสามารถสูงสุดในการดูดซับ Ni (II) Cu (II) และ Cr (VI) เท่ากับ 9 5 และ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

#### 2.5.4 พอลิเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส และยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ชีวภาพที่นิยมใช้เป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่ แป้ง ไคโตซาน และ เซลลูโลส ข้อดีของพอลิเมอร์ชีวภาพคือ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักคุ้มค่างบราคา หาได้ง่าย เนื่องจากมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำได้ดี และเป็นวัสดุที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง โมเลกุล เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และหมู่ฟังก์ชันเอมีน ทำให้สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำได้

(Barakat, 2011; Dong et al., 2010) อย่างไรก็ตามการนำพอลิ-เมอร์ชีวภาพใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโดยตรง ประสิทธิภาพการดูดซับยังไม่ดีพอ จึงต้องทำการปรับปรุงวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยวิธีการดัดแปรพันธะเคมีด้วยการสร้างหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุล โดยส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Crosslinking) และวิธีการกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Grafting copolymer) (Barakat, 2011) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแป้ง ไคโตซาน และเซลลูโลส แสดงดังตารางที่ 2.8 กลไกการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพเป็นการดูดซับทางเคมีเป็นหลัก โดยมีหมู่ฟังก์ชันเป็นปัจจัยหลัก จากการศึกษาของ Yan, Dai, Yang, Yang, and Cheng (2011) พบว่าเมื่อนำไคโตซานมาดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ที่ค่าพีเอช 5 เท่ากับ 130 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี โดยกลไกการดูดซับเกิดจากการเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลกับไอออนโลหะหนักเป็นหลัก และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Laus, Costa, Szpoganicz, and Fávere (2010) กลไกการดูดซับของไคซานที่มีการเพิ่มฟอสเฟตเข้าไปในโมเลกุลเป็นการดูดซับทางเคมี โดยการสร้างพันธะระหว่างฟอสเฟตกับโลหะหนัก การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเพียงชั้นเดียว เนื่องจากไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ และความสามารถในการดูดซับ Cu (II) Cd (II) และ Pb (II) มีค่าเท่ากับ 130.72 83.75 และ 166.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 6 7 และ 5 ตามลำดับ

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งอยู่หลายการศึกษาด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 การศึกษาของ Dong et al. (2010) พบว่าการดัดแปรแป้งให้มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ที่สารละลายพีเอช 5.5 ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) และ Cr (VI) เท่ากับ 8.13 และ 12.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กลไกการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากเกิดการดูดซับที่พื้นผิววัสดุเพียงชั้นเดียว โดยการดูดซับเกิดจากการยึดเกาะโมเลกุลระหว่างอะมิโนกับไอออนโลหะหนัก และจากการศึกษาของ Cheng et al. (2009) พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งดัดแปรที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์มากกว่าสมการของฟรุนดิช แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการดูดซับที่แตกต่างกัน โดย Cr (VI) ในรูป  $\text{HCrO}_4^-$  และ  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  สามารถเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ได้ทั้งกับ  $\text{NH}_3^+$  และ  $\text{NH}_2$  โดยที่สารละลายมีพีเอช 4 ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) เท่ากับ 10.94 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการฟื้นฟูวัสดุดูดซับพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถฟื้นฟูสภาพการใช้งานได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก เป็นต้น หรือสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic Acid; EDTA) (Crini, 2005; O'Connell et al., 2008)



## ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้ง

วัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	qe (meq/g)	อ้างอิง
แป้งอะมิโน	Cu (II)	0.52	Dong et al., (2010)
	Cr (VI)	1.44	
แป้งออกซิไดซ์	Pb (II)	0.9	Liu et al., (2018)
	Cu (II)	2.5	
แป้งแคทไอออน	Cr (VI)	4.12	Xing et al., (2006)
แป้งข้าวโพด	Pb (II)	0.07	Awokoya et al., (2012)
แป้งอะมิโน	Cu (II)	1.37	Xie et al., (2011)
	Cd (II)	0.96	
	Pb (II)	2.4	

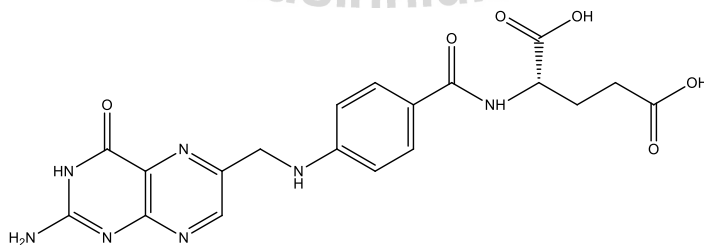
## 2.6. แป้งโมดิฟายด์

แป้งโมดิฟายด์ หรือแป้งดัดแปร (Modified Starch) คือแป้งธรรมชาติ (Native Starch) ที่ได้รับการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติให้แตกต่างออกไปจากแป้งธรรมชาติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งทางกายภาพหรือทางเคมีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโมเลกุลของแป้งภายในเม็ดแป้ง วิธีการในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลภายในของเม็ดแป้งมีหลายวิธี

### 2.6.1. ชนิดแป้งโมดิฟายด์

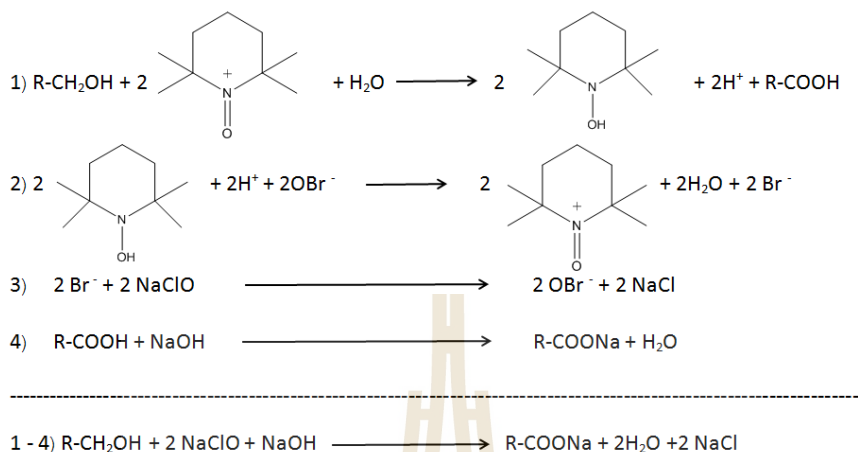
แป้งโมดิฟายด์แบ่งตามชนิดของประจุบนโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลแป้งหลังดัดแปรได้ 2 ชนิด คือ

ก. แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรพันธะทางเคมีด้วย ethylenediamine (ethylenediamine modified starch) ให้มีหมู่ฟังก์ชันแบบ  $-NH_3^+$  และ  $=NH_2^+$  หรือ  $-Na^+$ ,  $-K^+$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก

ข. แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรพันธะทางเคมี ด้วย 2,6,6,6-Tetramethylpiperidine-l-oxly radical (TEMPO) ให้มีหมู่ฟังก์ชันแบบ  $-COO^-$ , หมู่ฟอสเฟส, คาร์บอกซิล หรือมีหมู่  $OH^-$  เมื่อละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ

#### 2.6.2. ชื่อทางการค้าแป้งโมดิฟายด์

การเรียกชื่อแป้งโมดิฟายด์นิยมเรียกตามวิธีการและสารเคมีในการดัดแปร โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ สำหรับการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังของไทยมีวิธีการดัดแปร 3 วิธี (C. Ratanawaraha et al., 2000) ดังสรุปในตารางที่ 2.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก. Degradation หรือ Conversion คือ การทำให้แป้งมีความเหนียวลดลงด้วยการใช้สารเคมี มีอยู่ 3 วิธี ประกอบด้วย

- Acid Conversion คือ การนำแป้งมาเติม Hydrochloric and sulfuric acids เพื่อให้ความเหนียวของแป้งลดลง และสามารถคงรูปเจล (Gel) ได้โดยการทำให้เย็น แป้งที่ได้เรียกว่า Acid Modified Starch

- Oxidization คือ การนำแป้งมาทำปฏิกิริยากับ sodium hypochlorite ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้โมเลกุลแป้งเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการเติมหมู่คาร์บอกซิล และคาร์บอนิล เข้าไปทำให้แป้งที่ได้ เกิดการคืนตัวน้อย หรือไม่เกิดการคืนตัวเลย ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลจะถูกตัดด้วย ทำให้แป้ง มีความหนืดลดลง แป้งที่ได้เรียกว่า “oxidized starch”

- Dextrinization หรือ pyroconversion คล้ายกับแป้งดัดแปรด้วยกรดแต่ระดับการย่อยสลายพันธะกลูโคซิดิกจะสูงกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะละลายได้ดีในน้ำเย็น วิธีการนี้จะไม่ทำในสภาพที่เป็นสารแขวนลอยของแป้ง เนื่องจากจะมีการสูญเสียแป้งบางส่วนไปในขณะกรอง แต่จะให้ความร้อนกับแป้งในสภาพแห้งโดยมีการเติม hydrochloric acid หรือ ortho-phosphoric acid ไปด้วย แป้งที่ได้เรียกว่า “Dextrin starch”

ข. Pregelatinization แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งดัดแปรแบบง่ายๆ ทำโดยการให้ความร้อนกับแป้งที่แขวนลอยในน้ำ โดยการเทลงบนผิวถังร้อน แป้งจะแห้งและสุกเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำแผ่นแป้งไปต้มผ่านตะแกรงเป็นแป้งอีกครั้ง แป้งที่ได้นี้จะมีคุณสมบัติเป็นกาวทันทีเมื่อถูกน้ำเย็น จึงมีชื่อเรียกว่า Cold Water Soluble starch (CWS) หรือแป้งอัลฟา (Alpha starch) หรือแป้งที่แปรรูปโดยกระบวนการทางกายภาพ (Physically modified หรือ Converted starch) ซึ่งแป้งที่ได้นี้จะสุก 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องใช้ความร้อนในการทำให้เป็นกาวได้

ค. Derivation คือ การเกิดอนุพันธ์ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับสารเคมีที่เติมเข้าไป ทำให้โมเลกุลหรือคุณสมบัติของแป้งเปลี่ยนไป จากวิธีนี้จะได้แป้งแปรดัดแปร 2 ประเภทหลัก คือ

- แป้งเอสเทอร์ (Ester starch) และ แป้งอีเทอร์ (Ether starch) เกิดจากการแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง แป้งเอสเทอร์เตรียมโดยทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ระหว่างสารแขวนลอยแป้ง ในสภาพต่างกับกรดอินทรีย์ แป้งดัดแปรที่ได้มี 2 ประเภท คือ แป้ง Acetylated เตรียมโดยใช้ acetic anhydride หรือ vinyl acetate ที่ระดับการแทนที่ต่ำ (0.03-0.10) โมเลกุลแป้งจึงไม่ถูกทำลาย และแป้ง Phosphoric acid ester เตรียมด้วยการใช้ ortho-phosphoric acid หรือ sodium หรือ potassium ortho-phosphate หรือ sodium tripolyphosphate ส่วนแป้งอีเทอร์เตรียมโดยทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ระหว่างสารแขวนลอยแป้งในสภาพต่างกับ ethylene oxide แป้งชนิดนี้ได้แก่ แป้ง Carboxymethyl แป้ง Hydroxyethylated แป้ง Hydropropylated และแป้ง Cationic starch แป้งแคทไอออนิกเป็นแป้งที่มีประจุบวกโดยการเติมหมู่ quaternary ammonium เข้าไปทำให้แป้งมีลักษณะเป็น polyelectrolyte

- แป้งครอสลิง (Cross-linked starch) เตรียมโดยใช้สารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (Cross-link agent) เช่น โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodiummetabi sulphite) ฟอสฟอรัสออกไซด์ (Phosphorus oxide) และอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) เป็นต้น เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดการเชื่อมกับโมเลกุลของแป้ง

ตารางที่ 2.5 วิธีการผลิตแป้งตัดแปร

วิธีการ	ชนิดแป้ง	สารเคมีที่ใช้	คุณสมบัติของแป้ง
Degradation หรือ Conversion			
	Acid treated starch	hydrochloric acid ortho-phosphoric acid sulfuric acid	Final pH 4.8-7.0
	Oxidized starch	sodium hypochlorite	Carboxyl groups not more than 1.1% Residual sulfur dioxide not more than 50 mg/kg
	Bleached starch	peracetic acid hydrogen peroxide	Added carbonyl group not more than 0.1%
		sodium hypochlorite sodium chlorite	No residual reagent
		sulfur dioxide alternative permitted forms of sulfites	Residual sulfur dioxide not more than 50 mg/kg
		potassium permanganate ammonium persulfate sulfur dioxide alternative permitted forms of sulfites	Residual manganese not more than 50 mg/kg Residual sulfur dioxide not more than 50 mg/kg
	Dextrin starch	hydrochloric acid ortho-phosphoric acid	Final pH 2.5-7.0

## ตารางที่ 2.5 วิธีการผลิตแป้งตัดแปร (ต่อ)

วิธีการ	ชนิดแป้ง	สารเคมีที่ใช้	คุณสมบัติของแป้ง
Pregelatinization			
	Alpha starch	-	-
Derivation			
	Ester starch and Ether starch		
	Starch acetate	acetic anhydride หรือ vinyl acetate	Acetyl groups not more than 2.5%
	Hydroxypropyl starch	propylene oxide	Hydroxypropyl groups not more than 7.0%; propylene chlorohydrin not more than 1 mg/kg
	Starch sodium octenylsuccinate	octenylsuccinic anhydride	Octenylsuccinyl groups not more than 3%; and residual octenylsuccinic acid not more than 0.3%
	Monostarch phosphate	ortho-phosphoric acid หรือ sodium หรือ potassium ortho-phosphate หรือ sodium tripolyphosphate	Phosphate calculated as phosphorus not more than 0.5% for potato or wheat, and not more than 0.4% for other starches
	Cationic starch	quaternary ammonium	-
	Cross-linked starch	Sodiummetabi sulphite Phosphorus oxide Epichlorohydrin	-
Combine modification			
	Distarch phosphate	sodium trimetaphosphate หรือ phosphorus oxychloride	Phosphate calculated as phosphorus not more than 0.5% for potato and wheat, and not more than 0.4% for other starches
	Phosphated distarch phosphate	Monostarch phosphate และ Distarch phosphate	Phosphate calculated as phosphorus not more than 0.5% for potato and wheat, and not more than 0.4% for other starches

ตารางที่ 2.5 วิธีการผลิตแป้งตัดแปรร (ต่อ)

วิธีการ	ชนิดแป้ง	สารเคมีที่ใช้	คุณสมบัติของแป้ง
	Acetylated distarch phosphate	sodium trimetaphosphate หรือ phosphorus oxychlorideร่วมกับ acetic anhydride หรือ vinyl acetate	Acetyl groups not more than 2.5%; phosphate calculated as phosphorus not more than 0.14% for potato and wheat, and 0.04% for other starches; and vinyl acetate not more than 0.1 mg/kg
	Acetylated distarch adipate	acetic anhydrideadipic anhydride	Acetyl groups not more than 2.5% and adipate groups not more than 0.135%
	Hydroxypropyl distarch phosphate	sodium trimetaphosphate หรือ phosphorus oxychlorideร่วมกับ propylene oxide	Hydroxypropyl groups not more than 7.0%; propylene chlorohydrin not more than 1 mg/kg; and residual phosphate calculated as phosphorus not more than 0.14% for potato and wheat, and not more than 0.04% for other starches

ที่มา : <http://www.fao.org/docrep/w6355e/w6355e0o.htm>

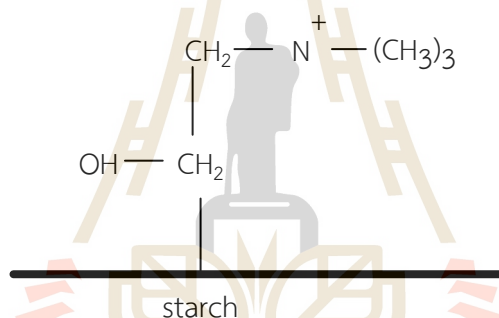
## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยนำแป้งโมดิฟายด์ที่มีในทางการค้า ใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย สถานที่ในการวิจัยคือ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของแป้งโมดิฟายด์ในน้ำเสียด้วยชุดทดลองแบบกะ มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1. แป้ง

แป้งโมดิฟายด์ ที่ใช้สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เรียกว่า “แป้งแคทไอออน หรือแป้งประจุบวก” ซึ่งเป็นแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้โครงสร้างแป้งมีประจุบวกเมื่อละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโมเลกุลแป้งแคทไอออน

#### 3.2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง เครื่องเขย่า (Shaker) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) และเครื่อง Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES)

#### 3.3. สารเคมีและการเตรียมสารละลาย

3.3.1. สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ คอปเปอร์คลอไรด์ ( $\text{CuCl}_2$ ) นิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) ตะกั่วคลอไรด์ ( $\text{PbCl}_2$ ) โพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) และกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ )

3.3.2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม มีวิธีการเตรียมดังนี้

ก. สารละลาย Cu (II) ชั่งคอปเปอร์คลอไรด์ หนัก 2.21 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ข. สารละลาย Ni (II) ชั่งตะกั่วคลอไรด์ หนัก 2.31 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ค. สารละลาย Pb (II) ชั่งตะกั่วคลอไรด์ หนัก 1.34 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ง. สารละลาย Cr (VI) โดยซิงโครไมท์ไฮดรอกไซด์จำนวน 2.83 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### 3.3.3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม

ปีเปต Cu (II) Ni (II) Pb (II) และ Cr (VI) 38 6 38 และ 30 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดปรับปริมาตร 2000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ความเข้มข้นโลหะหนักของสารละลายโลหะหนักแบบผสมที่ใช้ศึกษา มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.128 0.2 0.14 และ 0.756 นอร์มอลิตี ตามลำดับ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับค่า pH ที่ 5.5 ด้วย 0.1 N NaOH และ 0.1 N HCl

## 3.4. ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน จลนพลศาสตร์และสมดุลการดูดซับ โดยทำการศึกษาด้วยชุดทดลองแบบกะ สภาวะในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1 มีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ	
	ระยะเวลาสัมผัส	ปริมาณแป้ง
ปริมาณแป้ง (g)	0.1	0.1-1
ความเร็วรอบ (rpm)	150	150
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	
pH	5.5	
ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	2-180	120
ความเข้มข้นโลหะหนัก	Cu (II) = 0.13 N, Ni (II) = 0.0008 N , Pb (II) = 0.14 N, Cr (VI) = 0.75 N	



### 3.4.1 การแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมพัทธ์

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของวัสดุดูดซับ หรือ จุดสมดุลของระบบ ดังนั้นในการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยดัดแปรจึงทำการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ ในการทดลองได้ทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาดูดซับ ได้แก่ 2 4 6 8 10 20 40 60 80 100 120 150 และ 180 นาที วิธีการทดลองใช้แป้งแคทไอออน 0.1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 นำขวดรูปชมพู่ใส่เครื่องเขย่า เขย่าทิ้งไว้ด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2-180 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง และกรองแยกแป้งและสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP-OES ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้นโลหะหนักที่วัดได้คำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$q_e = \frac{(C_1 - C_2)V}{W} \quad (3.1)$$

โดยที่

$q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (meq/g)

$C_1$  = ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (meq/L)

$C_2$  = ความเข้มข้นโลหะหนักหลังการดูดซับ (meq/L)

$V$  = ปริมาตรสารละลายโลหะหนักที่ใช้ (ml)

$W$  = น้ำหนักของแป้งแคทไอออนที่ใช้ในการดูดซับ (g)

### 3.4.2 การแปรเปลี่ยนปริมาณแป้ง

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับ และเพื่อศึกษาสมดุลการดูดซับโลหะหนักในสารละลายแบบผสมด้วยแป้งแคทไอออน จึงทำการทดลองแปรเปลี่ยนปริมาณแป้งในการดูดซับตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 กรัม ที่ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น  $Cu(II) = 0.13 N$ ,  $Ni(II) = 0.0008 N$ ,  $Pb(II) = 0.14 N$ ,  $Cr(VI) = 0.75 N$  ทำการทดลองดังนี้ ชั่งน้ำหนักแป้งแคทไอออน 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแบบผสม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 นำขวดรูปชมพู่ใส่เครื่องเขย่า เขย่าทิ้งไว้ด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง และกรองแยกแป้งและสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไป

วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP-OES ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้นโลหะหนักที่วัดได้คำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ 3.1

### 3.4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic modeling) หรือ การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน แบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่ศึกษามี 3 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) และแบบจำลองการแพร่ในรูพรุน (Intra-particle model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการแปรเปลี่ยนระยะเวลาจาก 2 นาที จนถึงระยะเวลาเข้าสู่สมดุล มาวิเคราะห์ด้วยสมการเส้นตรงตามสมการที่ (3.2) – (3.4) พิจารณาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination:  $R^2$ ) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (3.2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.3)$$

;

$$q_t = k_d t^{1/2} + C \quad (3.4)$$

โดยที่

$q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (meq/g)

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาหนึ่ง ๆ (meq/g)

$k_1$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ( $t^{-1}$ )

$k_2$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (meq/g.min)

$t$  = ระยะเวลาที่ใช้ดูดซับ (min)

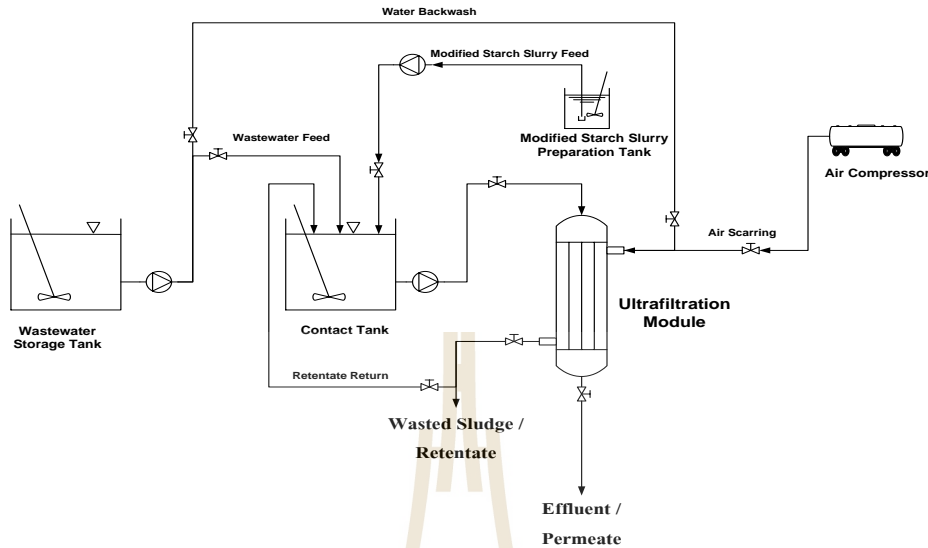
$k_d$  = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุนวัสดุดูดซับ (meq/q.min)

$C$  = ค่าผลกระทบจากความหนาชั้นฟิล์ม (meq/g)

### 3.5. การเดินระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ทำการเดินระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) แบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อน Cu (II) Ni (II) Pb (II) และ Cr (VI) รายละเอียดของเยื่อกรองเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 3.2 ทำการติดตั้งชุดทดลอง ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสูรณารี่แสดงดังรูปที่ 3.2 ทำการศึกษาประสิทธิภาพดัดซับโลหะหนักด้วยแป้งโมดิไฟยัด และ พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ UF



รูปที่ 3.2 การติดตั้งชุดทดลองระบบดัดซับร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะของอัลตราฟิลเตรชัน	คุณสมบัติ
ยี่ห้อ (Manufacturer)	Ultra-Flo
รุ่น (Model)	BT-420
วัสดุเส้นใย (Fiber Material)	Hydrophilic PAN
รูปแบบเมมเบรน (Configuration)	Hollow fiber (Out-to-In)
Recovery	100% (Dead End Filtration)
ขนาดเมมเบรน	4" diameter x 20" length
ขนาด Housing	6" diameter x 24" length
พื้นที่ผิวของเมมเบรน	4.6 m <sup>2</sup>
ช่วงน้ำหนักโมเลกุลที่กักกันสาร (MWCO) (ดาร์ตัน)	100,000
ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งาน	3-9
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	< 50 °C
ช่วงแรงดันในการเดินระบบ	< 2.0 bar
Product turbidity	< 0.1 NTU
อัตราการไหล (@ 1 bar)	± 1.4 m <sup>3</sup> /h (City water)

ที่มา : Ultra-Flo Pte Ltd.

### 3.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น

ทำการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่นโดยการแปรเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบได้แก่ ค่าแรงดันเริ่มต้นเพอมีเอทฟลักซ์ สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. ความต้านทานเริ่มต้นของเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่นเป็นการตรวจสอบความต้านทานของระบบกรองก่อนเริ่มเดินระบบด้วยการกรองน้ำสะอาดผ่านเยื่อกรองเมมเบรน โดยดูความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์กับแรงดันเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานเริ่มต้นเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความต้านทานของเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu R} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $J$  คือฟลักซ์ของสารละลายผ่านเมมเบรน ( $m^3/m^2/sec$ )

$\Delta P$  คือผลต่างของความดันที่ใช้กับสารละลาย (Pa)

$\Delta \pi$  คือผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (Pa)

$\mu$  คือความหนืดของสารละลาย (Pa/sec)

$R$  คือความต้านทานต่อกาไหลผ่าน

สำหรับน้ำบริสุทธิ์และสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ค่า  $\Delta \pi$  มีค่าเท่ากับศูนย์และน้อยกว่า  $\Delta P$  มากๆ ดังนั้นสามารถตัด  $\Delta \pi$  ทิ้งได้จะได้สมการที่ 3.6

$$R_t = R_{mo} + R_d \quad (3.6)$$

เมื่อ  $R_{mo}$  คือ ความต้านทานเริ่มต้น (Per Meter)

$R_d$  คือ ความต้านเนื่องจากจากชั้นเจล (Per Meter)

สำหรับการกรองน้ำสะอาด  $R_d = 0$  ดังนั้น

$$\Delta P = J \times \mu \times R_t \quad (3.7)$$

ข. การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น (Initial Permeate Flux) ทำการศึกษาโดยควบคุมสัดส่วนมวลของโลหะหนักต่อแป้งโมดิฟายด์เท่ากับ 1:2 แล้วจึงทำการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น โดยแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 50 40 และ 30 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง เพื่อหา

สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น และประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** การแปรผันเพอเมอเทฟลักซ์

ชุดการทดลอง	RUN I	RUN II	RUN III
เพอเมอเทฟลักซ์ (L/m <sup>2</sup> -h)	50	40	30

ค. การแปรผันแรงดันรีเทนเทน (Retentate Pressure) ทำการศึกษาโดยแปรผันแรงดันรีเทนเทนจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 25:75 50:50 และ 75:25 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น และประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักดังรายละเอียดในตารางที่ 3.4

**ตารางที่ 3.4** การแปรผันสัดส่วนเพอเมอเทต่อรีเทนเทน

ชุดการทดลอง	RUN I	RUN II	RUN III
แรงดันรีเทนเทน (MPa)	0.14	0.18	0.20

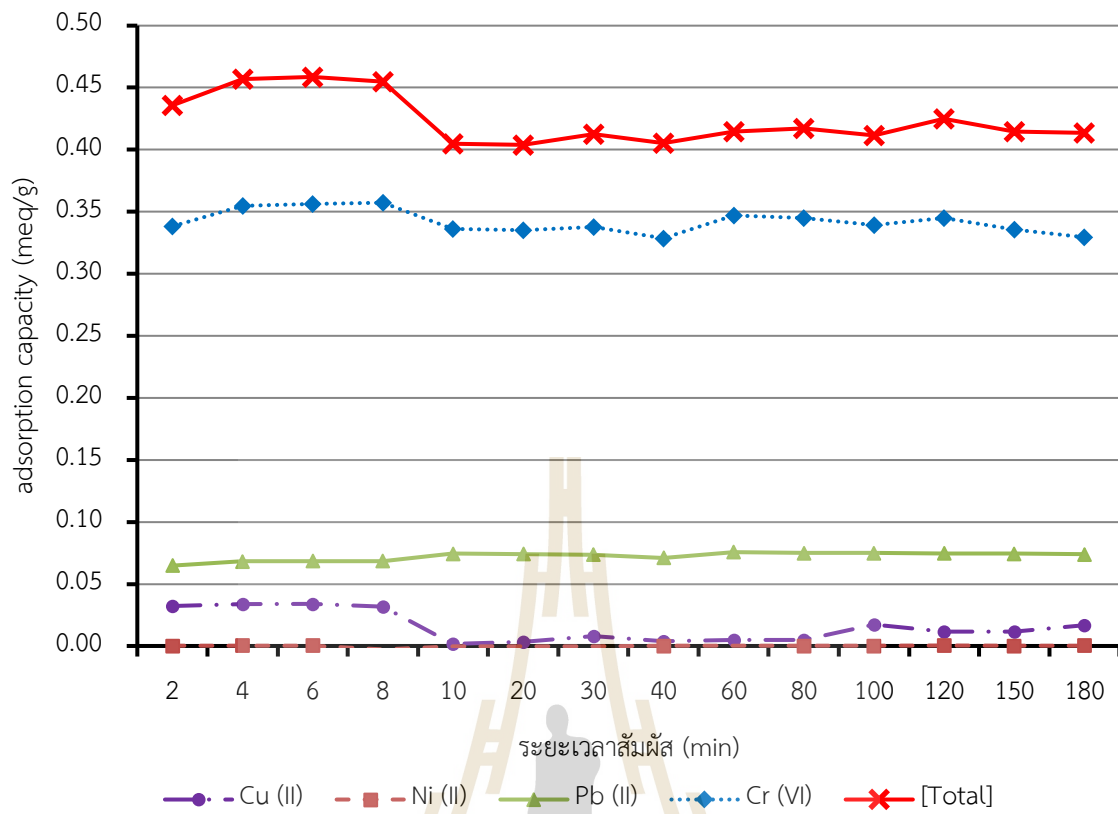
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

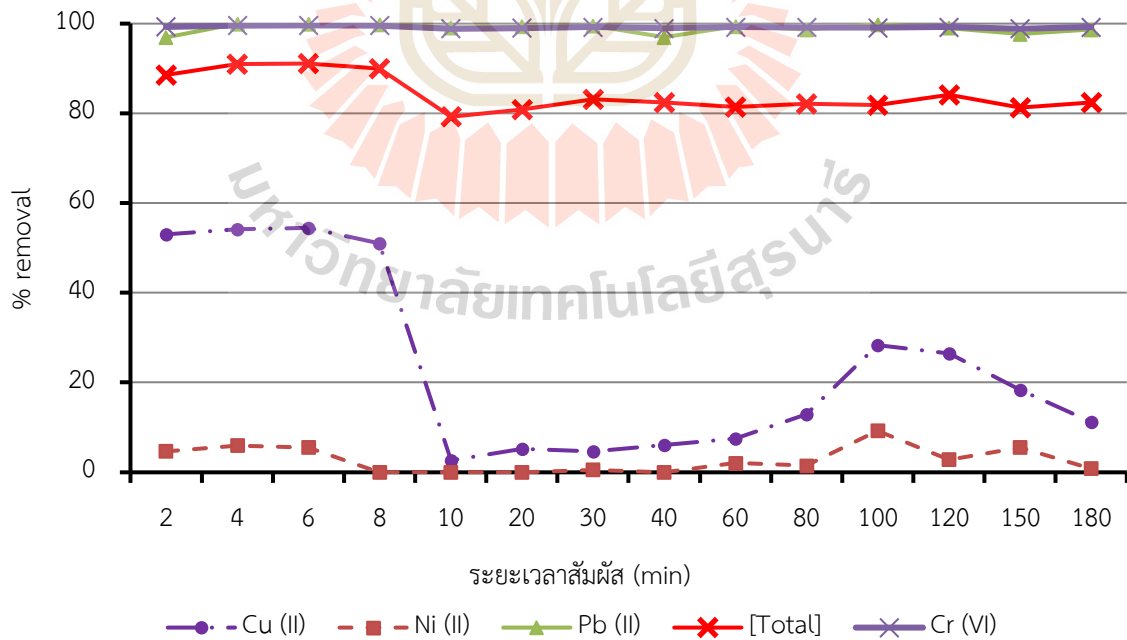
การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแป้งแคทไอออน ซึ่งเป็นแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่หมู่ฟังก์ชันเป็นอะมิโน (Amino functional group) ด้วยชุดทดลองแบบกะ (Batch Reactors) โดยการศึกษาประกอบด้วย (1) ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (2) ผลกระทบของปริมาณแป้งแคทไอออนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และ (3) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1. ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากสารละลายไอออน Cu (II) Ni (II) Pb (II) และ Cr (VI) ความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วงของความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรสำเร็จรูป การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน โดยการแปรเปลี่ยนระยะเวลาประกอบด้วย 2 4 6 8 10 20 40 60 80 100 120 150 และ 180 นาที ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น Cu (II) = 0.13 นอร์มอลลิที, Ni (II) = 0.0008 นอร์มอลลิที, Pb (II) = 0.14 นอร์มอลลิที, Cr (VI) = 0.75 นอร์มอลลิที ที่ค่าพีเอช 5.5 และใช้แป้งแคทไอออน 0.1 กรัม ต่อสารละลาย 50 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าช่วง 8 นาทีแรก ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งหมดของแป้งแคทไอออนมีค่าสูงสุดประมาณ 0.46 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับเป็นร้อยละ 91 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็น 10 นาที ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักลดลงเหลือประมาณ 0.41 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม และคงที่จนกระทั่งระยะเวลา 180 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ยร้อยละ 82 ในช่วง 8 นาทีแรก แป้งแคทไอออนมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้สูงเนื่องจากในช่วงระยะเวลานี้เกิดการดูดซับ Cu (II) ด้วย แต่หลังจากนาที่ที่ 10 ไม่เกิดการดูดซับ Cu (II) ขึ้น โดยแป้งแคทไอออนสามารถดูดซับ Cr (VI) สูงสุด เท่ากับ 0.34 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับประมาณร้อยละ 99 โดยความสามารถในการดูดซับในแต่ละช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกัน รองลงมาคือ Pb (II) ความสามารถในการดูดซับในช่วง 10 นาทีแรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.07 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม และคงที่ไปจนกระทั่งถึง 180 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับประมาณร้อยละ 99 ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ในช่วง 8 นาทีแรกเท่ากับ 0.03 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับประมาณร้อยละ 54 และการดูดซับ Ni (II) ไม่เกิดขึ้นเลย ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ยเพียงร้อยละ 5 ในช่วง 6 นาทีแรกของการดูดซับ จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาสมดุลการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนอยู่ที่ประมาณ 10 นาที



รูปที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนที่ระยะเวลาต่างๆ



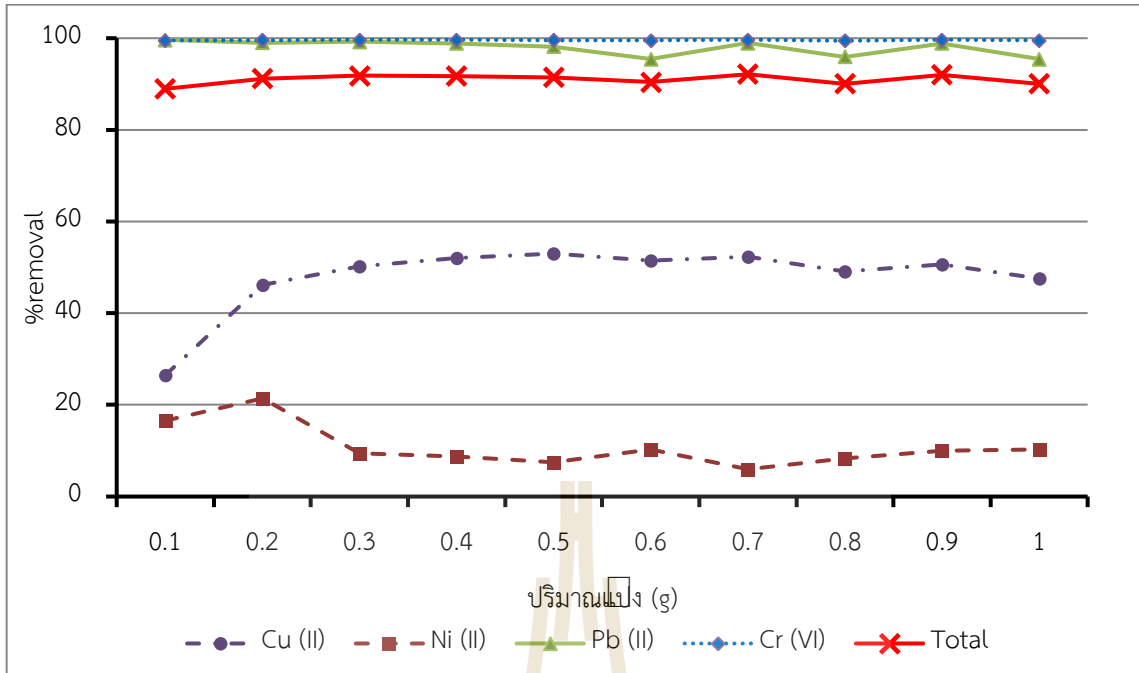
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนที่ระยะเวลาต่างๆ

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแป้งแคทไอออนจากมากไปน้อย เท่ากับ 0.34 0.07 0.03 และ 0 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ของ Cr (VI) Pb (II) Cu (II) และ Ni (II) ตามลำดับ แป้งแคทไอออนมีความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) ได้มากที่สุดเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ จึงเกิดการสร้างพันธะกับ Cr (VI) ที่อยู่ในรูป  $\text{HCrO}_4^-$  ในสารละลายพีเอช 5.5 เป็นส่วนใหญ่ และโลหะหนักประจุบวกสอง จะเกิดการสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันอื่น หรือหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีประจุเป็นกลางมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทำหน้าที่เป็นลิแกนด์สร้างพันธะกับไอออนของ Pb (II) Cu (II) และ Ni (II) (Dong et al., 2010) โดยความสามารถในการสร้างพันธะของไอออนโลหะหนักประจุบวกสอง ขึ้นอยู่กับค่า electro-selectivity ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการสร้างพันธะของไอออน Pb (II) มีค่า electro-selectivity เท่ากับ 9.9 สูงกว่า ค่า electro-selectivity ของ Cu (II) และ Ni (II) ที่มีเพียง 3.8 และ 3.9 เท่านั้น ทำให้ในการดูดซับไอออนของ Pb (II) เกิดการดูดซับที่โครงสร้างโมเลกุลของแป้งก่อน จึงสามารถดูดซับ Cu (II) ได้เพียงเล็กน้อย ส่วน Ni (II) ไม่ถูกดูดซับเลย (Metcalf & Eddy, 2003; Ciosek et al., 2017)

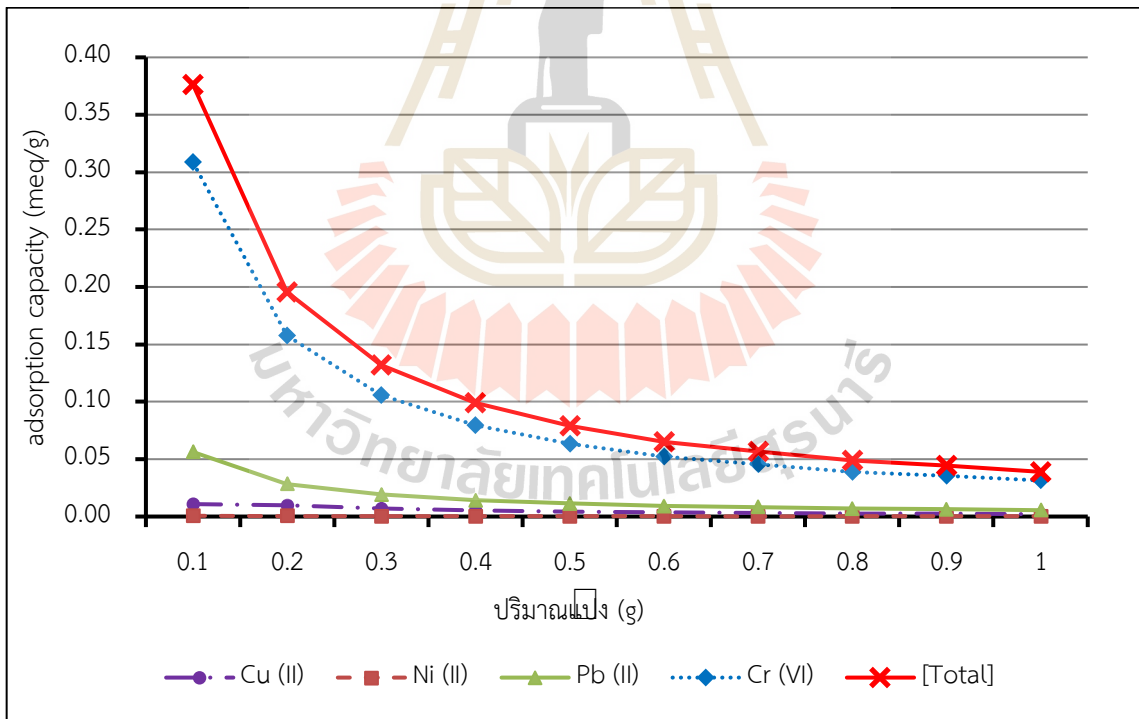
#### 4.2. ผลกระทบของปริมาณแป้งแคทไอออนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาผลกระทบของปริมาณแป้งแคทไอออนต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยทำการแปรเปลี่ยนปริมาณแป้งประกอบด้วย 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 กรัม โดยใช้สารละลายโลหะหนักแบบผสม ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น Cu (II) 0.13 นอร์มอลลิตี, Ni (II) 0.0008 นอร์มอลลิตี, Pb (II) 0.14 นอร์มอลลิตี, Cr (VI) 0.75 นอร์มอลลิตี ที่ค่าพีเอช 5.5 ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของแป้งแคทไอออนรวมทั้งหมดเฉลี่ยประมาณร้อยละ 92 ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งจาก 0.1 กรัม เป็น 0.2 กรัม ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 88 เป็นร้อยละ 92 และเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งถึง 1 กรัม ประสิทธิภาพการดูดซับยังคงที่ประมาณร้อยละ 92 พิจารณาที่ประสิทธิภาพการดูดซับ Cr (VI) และ Pb (II) ในสารละลายโลหะหนักที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งถูกดูดซับมากถึงร้อยละ 99 ในปริมาณแป้งแคทไอออน 0.1 กรัม และเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งแคทไอออนจนถึง 1 กรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr (VI) และ Pb (II) ยังคงมากถึงร้อยละ 99 สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับ Cu (II) มากสุดที่แป้งแคทไอออน 0.3 กรัม เนื่องจากปริมาณแป้งแคทไอออนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ตำแหน่งในการเกิดการดูดซับเพิ่มมากขึ้น Cu (II) จึงถูกดูดซับจนลดลงเหลือประมาณร้อยละ 50 และคงที่จนเพิ่มปริมาณแป้งถึง 1 กรัม ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับ Ni (II) มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่แป้ง 0.2 กรัม เฉลี่ยร้อยละ 21 แต่เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มเป็น 0.3 ถึง 1 กรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับ Ni (II) ลดลงเหลือเพียงประมาณร้อยละ 10





รูปที่ 4.3 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแ่งแคทไอออนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ



รูปที่ 4.4 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแ่งแคทไอออนต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

ในทางตรงข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณแ่งแคทไอออนจาก 0.1 กรัม ถึง 1 กรัม ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งหมดของแ่งแคท

ไอออนสูงสุด 0.38 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ที่ 0.1 กรัม และเมื่อเพิ่มปริมาณแ่งแคทไอออนจนถึง 1 กรัม ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักลดลงเหลือเพียง 0.04 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม สอดคล้องกับการศึกษาของ [Shah et al., \(2015\)](#) ทำการศึกษาผลของปริมาณมันสำปะหลังตัดแปรต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ Cu (II) พบว่าเมื่อปริมาณแ่งเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับ Cu (II) มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เนื่องจากไอออนของโลหะหนักเกิดพันธะกับหมู่ฟังก์ชันของแ่งตัดแปรหมดแล้วจึงเห็นได้จากประสิทธิภาพในการดูดซับ Cu (II) ที่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงร้อยละ 90.8 ที่ปริมาณแ่ง 120 มิลลิกรัม ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเพียง 45.4 มิลลิกรัมต่อกรัม แ่งที่มากเกินไปทำให้มีตำแหน่งว่างที่ไม่เกิดพันธะกับไอออนของโลหะหนัก

ดังนั้น สรุปได้ว่าการแปรเปลี่ยนปริมาณแ่งแคทไอออนที่ปริมาณแ่ง 0.1 กรัม มีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงสุด 0.38 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม โดย Cr (VI) ถูกดูดซับมากที่สุด 0.31 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 82 ของความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งหมดของแ่งแคทไอออน รองลงมาคือ Pb (II) ความสามารถในการดูดซับประมาณ 0.06 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 16 ของความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งหมดของแ่งแคทไอออน ที่เหลือร้อยละ 2 เป็นความสามารถในการดูดซับ Cu (II) ส่วน Ni (II) ไม่เกิดการดูดซับขึ้นเลย

#### 4.3. แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

พิจารณาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนักด้วยแ่งแคทไอออนด้วย 3 แบบจำลองประกอบด้วย พบว่า Pseudo-first-order model Pseudo-second-order model และ Intra-particle model ตามสมการ (1)-(3) ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.5-4.7 และตารางที่ 4.1

Pseudo-first-order model ;

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1/2.303)t \quad (4.1)$$

โดยที่  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาสมดุล (meq/g)

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาต่างๆ (meq/g)

$k_1$  = ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ( $\text{min}^{-1}$ )

$t$  = ระยะเวลาในการดูดซับ (min)

Pseudo-second-order model ;

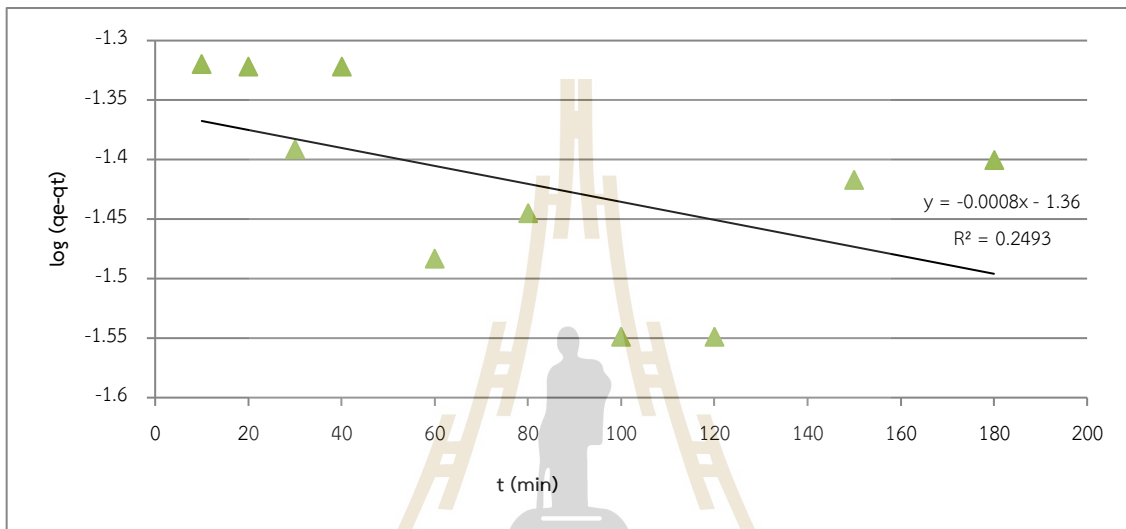
$$t/q_t = t/q_e + 1/(k_2q_e^2) \quad (4.2)$$

โดยที่  $k_2$  = ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (g/meq.min)

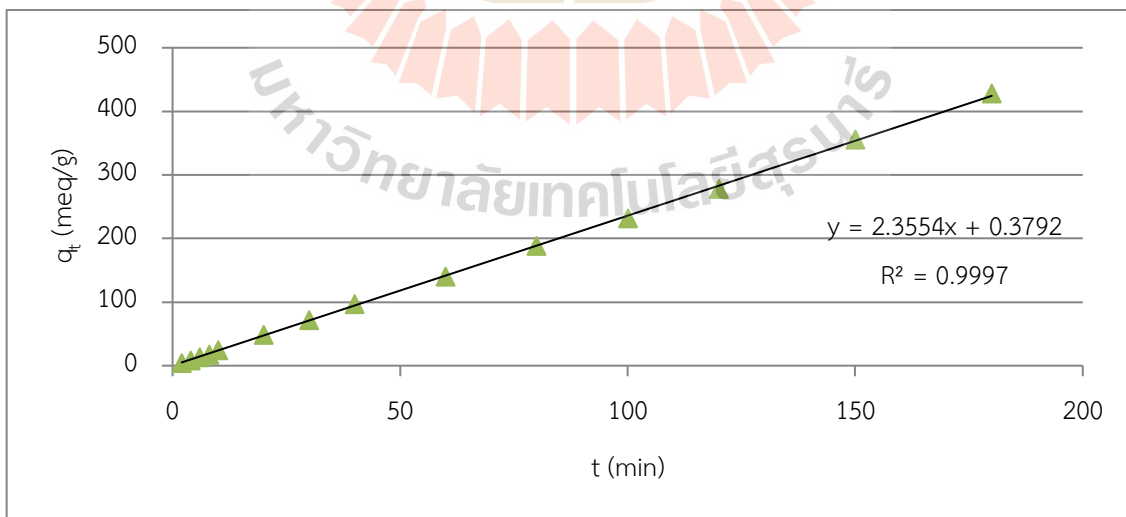
Intra-particle model ;

$$q_t = k_d t^{1/2} + C \quad (4.3)$$

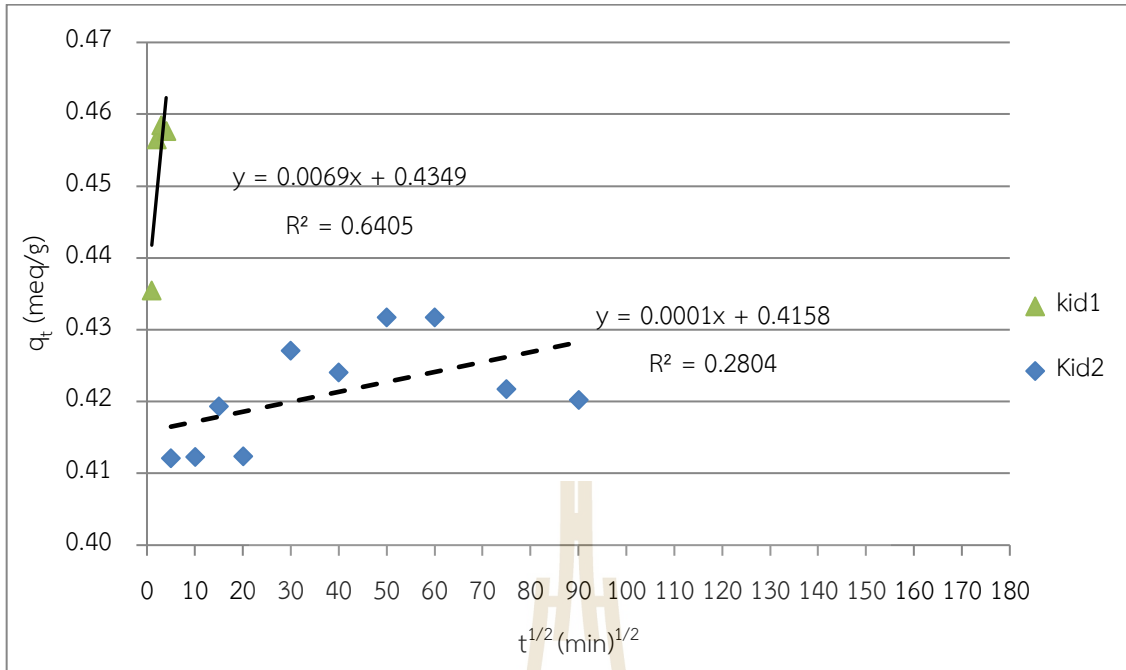
โดยที่  $k_d$  = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุนวัสดุดูดซับ (meq/q.min)  
 $C$  = ค่าผลกระทบจากความหนาชั้นฟิล์ม (meq/g)



รูปที่ 4.5 แบบจำลอง Pseudo-first-order ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน



รูปที่ 4.6 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน



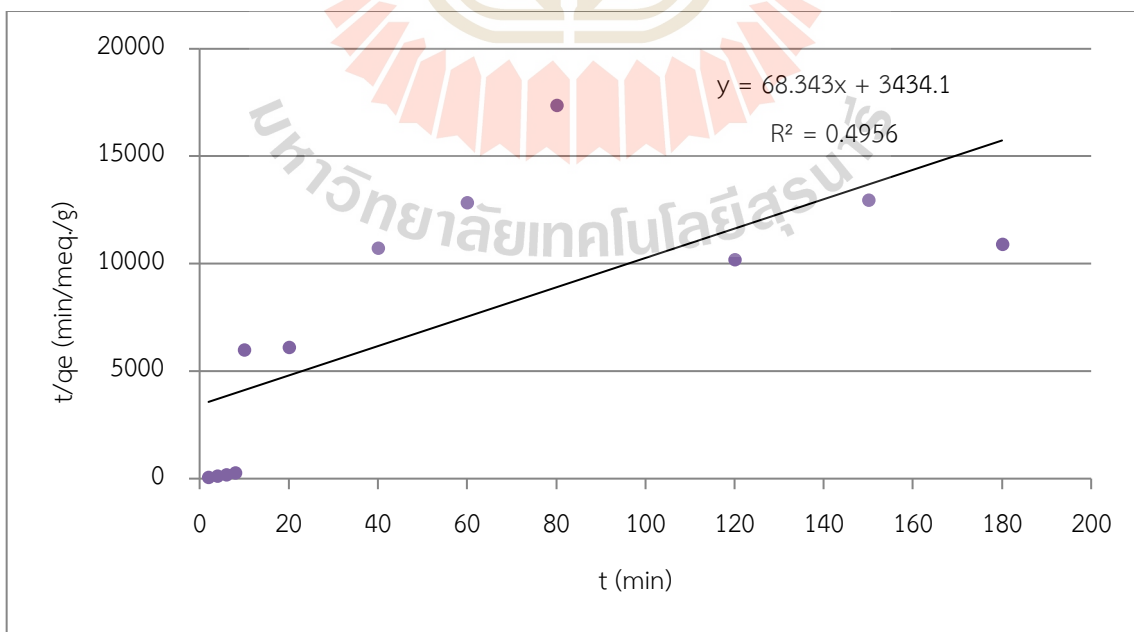
รูปที่ 4.7 แบบจำลอง Intra-particle ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออน

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์

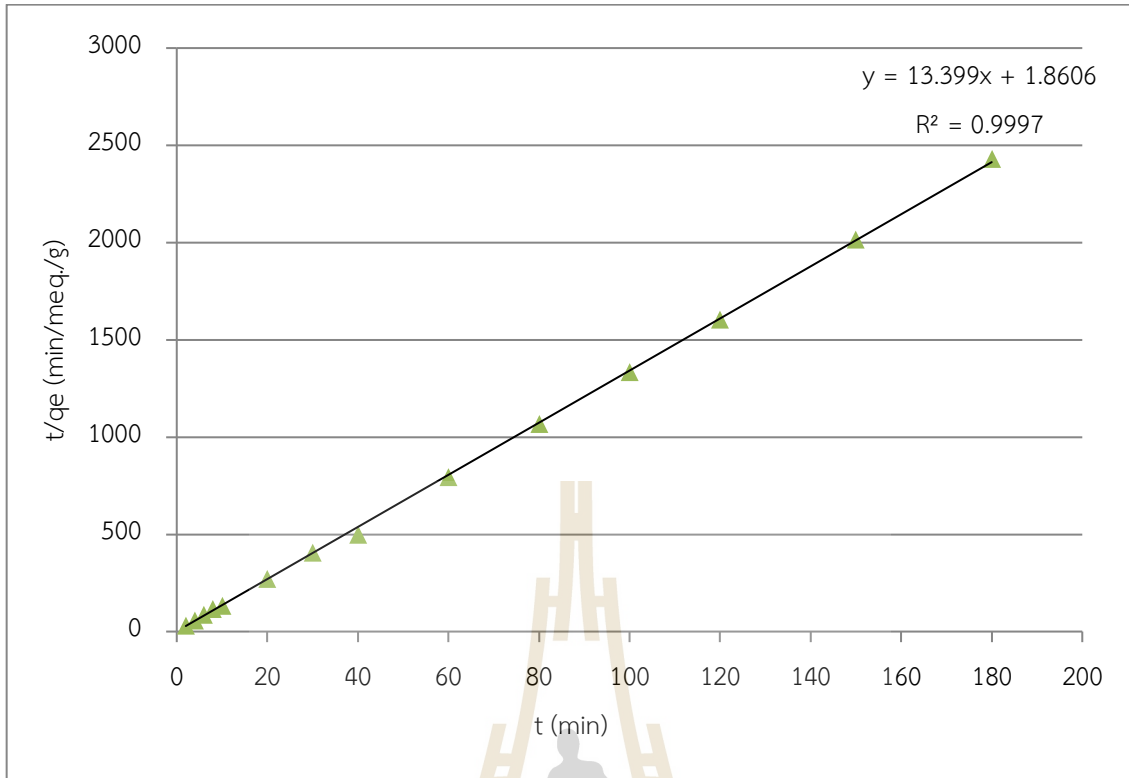
Model	parameter	
1 <sup>st</sup> order	$q_e$ (meq/g)	0.043
	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	5.38
	$R^2$	0.2493
2 <sup>nd</sup> order	$q_e$ (meq/g)	0.43
	$k_2$ (g/meq.min)	14.38
	$h$ (meq/g.min)	2.66
	$R^2$	0.9997
Intra-particle	$k_{id1}$ (meq/g.min <sup>1/2</sup> )	0.0069
	$C_1$	0.4349
	$R^2$	0.6405
	$k_{id2}$ (meq/g.min <sup>1/2</sup> )	0.0001
	$C_2$	0.4158
	$R^2$	0.2804

เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  พบว่า Pseudo-second-order model มีค่า 0.9997 ซึ่งใกล้เคียง 1 มากที่สุด ในขณะที่  $R^2$  ของ Pseudo-first-order model และ Intra-particle model มีค่าเพียง 0.2493 และ 0.6405 ตามลำดับ ดังนั้นจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนจึงสอดคล้องกับ Pseudo-second-order model มากที่สุด แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี ของการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของโลหะหนัก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการแพร่ของไอออนโลหะหนักไปยังพื้นที่ผิวของแป้ง ความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณได้เท่ากับ 0.43 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองที่จุดสมดุลซึ่งเท่ากับ 0.46 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม และอัตราเร็วในการดูดซับช่วงเริ่มต้นคำนวณจากสมการ  $h=k_2qe^2$  เท่ากับ 2.66 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมต่อนาที

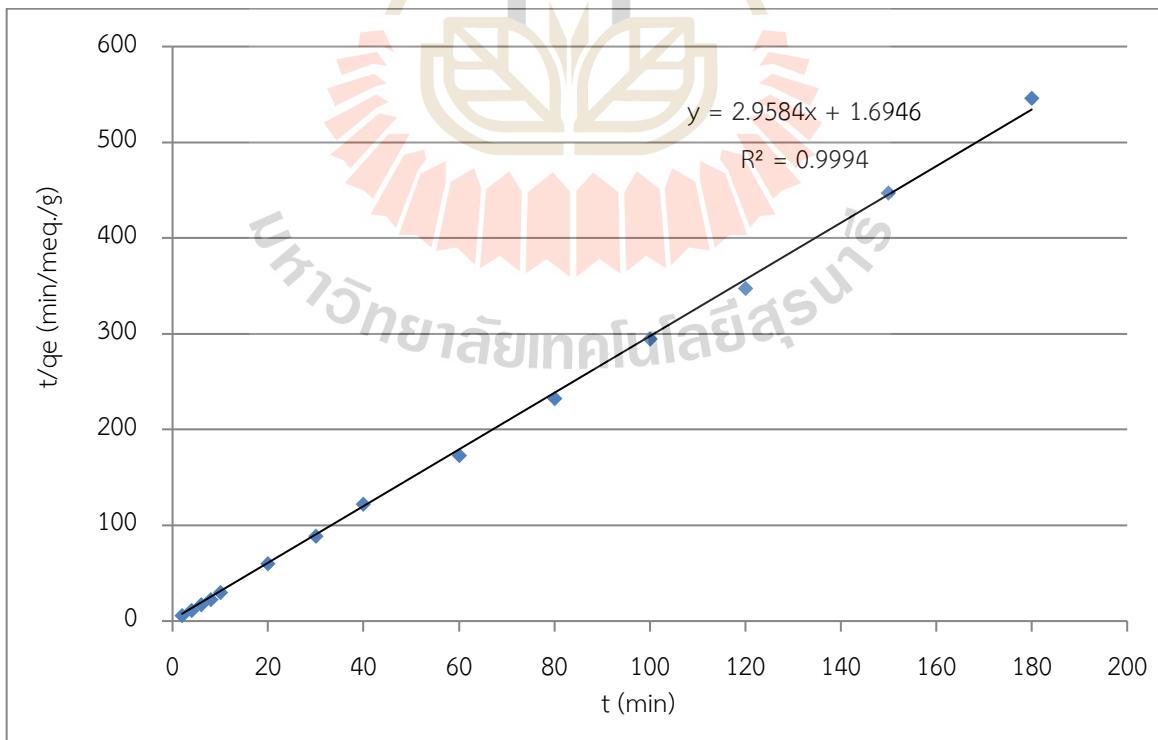
พิจารณาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu (II) Pb (II) และ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน ด้วยแบบจำลอง Pseudo-second-order model จากรูปที่ 4.8 ค่า  $R^2$  ของแบบจำลอง Pseudo-second-order ของการดูดซับ Cu (II) มีค่าเพียง 0.4956 ถือเป็นค่าที่ไม่สามารถยอมรับได้ จากการศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์การดูดซับโลหะหนักด้วย ซีโอไลต์ของ Ciosek et al., (2017) ระบุว่า  $R^2$  ช่วง 0.95-1.0 เป็นค่าที่ดีมาก  $R^2$  0.9-0.95 เป็นค่าที่ดี และ  $0.85 < R^2 < 0.9$  ยอมรับได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ไอออนของ Cu (II) ไม่ได้กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับด้วยแป้งแคทไอออน แต่เป็น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงค่า  $R^2$  ของแบบจำลอง Pseudo-second-order ที่มีค่าใกล้เคียง 1 เท่ากับ 0.9997 และ 0.9992 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับ Cu (II) ด้วยแป้งแคทไอออน



รูปที่ 4.9 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับ Pb (II) ด้วยแป้งแคทไอออน



รูปที่ 4.10 แบบจำลอง Pseudo-second order ของการดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งแคทไอออน

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จาก Pseudo-second-order model แป้งแคทไอออนสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้มากที่สุด เท่ากับ 0.34 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม รองลงมาเป็น Pb (II) เท่ากับ 0.074 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม และ Cu (II) เท่ากับ 0.015 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ส่วน Ni (II) ไม่ถูกดูดซับ ดังที่กล่าวในข้างต้น จากค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ของแป้งแคทไอออน กล่าวได้ว่า ไอออน Cr (VI) การสร้างพันธะระหว่าง Cr (VI) กับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนของแป้งแคทไอออนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับ คิดเป็นร้อยละ 77 ของความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งหมดของแป้งแคทไอออนซึ่งเท่ากับ 0.43 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับ Pb (II) และ Cu (II) มีสัดส่วนร้อยละ 17 และ 3 ของความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทั้งหมดของแป้งแคทไอออน ตามลำดับ อัตราเร็วในการดูดซับ Cr (VI) Pb (II) และ Cu (II) ช่วงเริ่มต้นเท่ากับ 0.123 0.53 และ 0.59 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ต่อนาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของ Pseudo-second-order model ของการดูดซับ Cr (VI), Pb (II) และ Cu (II)

Heavy metal	$m = 1/q_e$	$b=1/k_2 \cdot q_e^2$	$R^2$	$q_e$ (meq/g) (ทดลอง)	$q_e$ (meq/g) (คำนวณ)	$k_2$ (g/meq.min)	$h$ (meq/g.min)
Cu (II)	68.343	3434.1	0.4956	0.03	0.015	1.36	0.0003
Pb (II)	13.432	1.8606	0.9997	0.08	0.074	98.15	0.53
Cr (VI)	2.9584	1.6946	0.9992	0.34	0.34	5.16	0.59
[Total]	2.3554	0.3792	0.9997	0.46	0.43	14.35	2.66

#### 4.4. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกับวัสดุดูดซับอื่น ๆ

จากตารางที่ 4.3 พิจารณาความสามารถในการดูดซับ Cu (II) Pb (II) และ Cr (VI) ของแป้งแคทไอออนเทียบกับความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งชนิดต่าง ๆ จากการศึกษาอื่นๆ ที่ผ่านมามีพบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแป้งแคทไอออนมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่าแป้งแคทไอออนมีความสามารถในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำได้

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับอื่นๆ

วัสดุดูดซับ	โลหะหนัก	qe (meq/g)	อ้างอิง
ซีโอไลท์	Pb (II)	0.054	Ciosek et al., (2017)
	Fe (III)	0.032	
	Cu (II)	0.017	
	Ni (II)	0.005	
	Total	0.116	
แป้งอะมิโน	Cu (II)	0.52	Dong et al., (2010)
	Cr (VI)	1.44	
แป้งออกซิไดซ์	Pb (II)	0.9	Liu et al., (2018)
	Cu (II)	2.5	
แป้งแคทไอออน	Cr (VI)	4.12	Xing et al., (2006)
แป้งข้าวโพด	Pb (II)	0.07	Awokoya et al., (2012)
แป้งอะมิโน	Cu (II)	1.37	Xie et al., (2011)
	Cd (II)	0.96	
	Pb (II)	2.4	
แป้งแคทไอออน	Cu (II)	0.015	การศึกษานี้
	Pb (II)	0.074	
	Cr (VI)	0.34	
	Total	0.43	



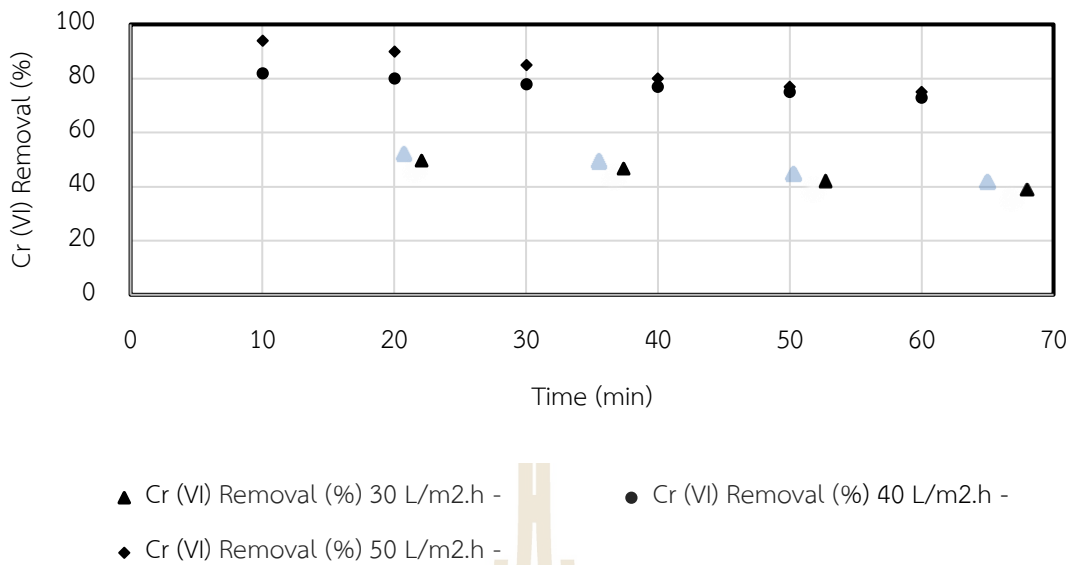
## 4.5 การศึกษาศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการดูดซับด้วยแป้งโมดิฟายด์

ทำการศึกษโดยใช้แป้งอะมิโนเป็นตัวดูดซับ และทำการติดตั้งชุดทดลองระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 เดือนโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อนของ Cr (VI) ทำการศึกษาประสิทธิภาพดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ UF ทำการศึกษาโดยการแปรผันเพอเมอทิฟลักซ์ การแปรผันสัดส่วนเพอเมอทิฟลักซ์ต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์ โดยมีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

### 4.5.1 ผลกระทบของค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้น

ผลการศึกษาผลกระทบของค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 94 ที่ค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้น 50 L/m<sup>2</sup>.h และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเมื่อค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นลดลงโดยพบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 84 และร้อยละ 72 ที่ค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 40 L/m<sup>2</sup>.h และ 30 L/m<sup>2</sup>.h ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นจะมีผลทำให้ปริมาณแป้งโมดิฟายด์ที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแป้งโมดิฟายด์นั้นเป็นตัวดูดซับจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเกิดได้ได้ดีขึ้นเมื่อค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องในการศึกษาที่ผ่านมาของ [Bade et al. \(2008\)](#) และ [Shon et al. \(2004\)](#) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นเป็นการเพิ่มแรงดันน้ำหน้าผิวเมมเบรนส่งผลให้มลพิษถูกอันเข้าไปในผิวเมมเบรนซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็กเมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลานานอาจทำให้มลพิษนั้นหลุดผ่านเยื่อกรองเมมเบรนออกไปได้ ดังนั้นการพิจารณาเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นจำเป็นต้องพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักและการป้องกันมลพิษหลุดผ่านเยื่อกรองเมมเบรนในระยะยาว

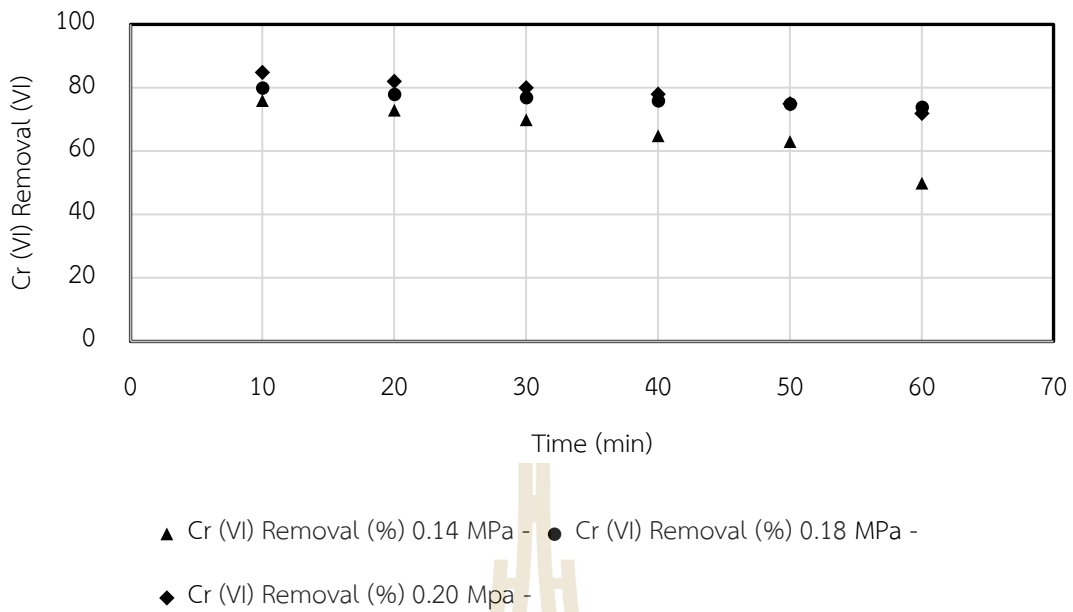
รีเลทีฟฟลักซ์ (Relative Flux) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการกรองซึ่งในการศึกษานี้พบค่ารีเลทีฟฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.55 0.70 และ 0.85 ที่ค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 50 L/m<sup>2</sup>.h 40 L/m<sup>2</sup>.h และ 30 L/m<sup>2</sup>.h ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่ารีเลทีฟฟลักซ์มีค่าลดลงเมื่อค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องในการศึกษาที่ผ่านมาของ [Bohdziewicz et al. \(1999\)](#); [Beak et al. \(2004\)](#) และ [Bade et al. \(2008\)](#) ดังนั้นเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมของทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดและผลกระทบของค่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นแล้วพบว่าเพอเมอทิฟลักซ์เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมในการกำจัด Cr (VI) และเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการศึกษานี้เท่ากับ 40 L/m<sup>2</sup>.h



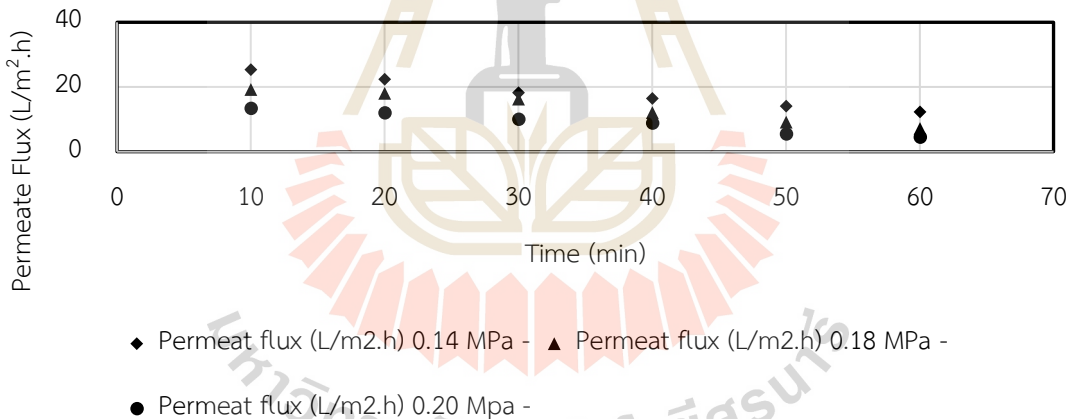
รูปที่ 4.11 ผลกระทบของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้น

#### 4.5.2 การแปรผันแรงดันรีเทนเทท

จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 85 ที่ค่าแรงดันรีเทนเทท 0.2 MPa และลดลงโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80 และร้อยละ 76 ที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.18 MPa และ 0.14 MPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [Gzara และ Dhahbi \(2001\)](#) และการศึกษาของ [Bade et al. \(2008\)](#) ซึ่งอธิบายไว้ว่าเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นตัวดูดซับจะเกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงกว่า Bulk solution ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะเกิดสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันรีเทนเทท และเมื่อพิจารณาค่า specific flux ดังรูปที่ 4.13 พบว่ามีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มแรงดันรีเทนเทท โดยจากการศึกษาพบว่าที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.14 MPa มีค่าเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 25.3 L/m<sup>2</sup>.h และค่าเท่ากับ 19.2 L/m<sup>2</sup>.h และ 13.4 L/m<sup>2</sup>.h ที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.18 MPa และ 0.20 MPa ตามลำดับ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมฟอสเฟตบริเวณผิวเมมเบรนขึ้นเนื่องจากการเพิ่มแรงดันรีเทนเททจะทำให้เกิดการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเลือกใช้ค่าแรงดันรีเทนเททที่ต่ำจะช่วยในการเพิ่มค่าเพอมีเอทฟลักซ์



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อการกำจัดโครเมต



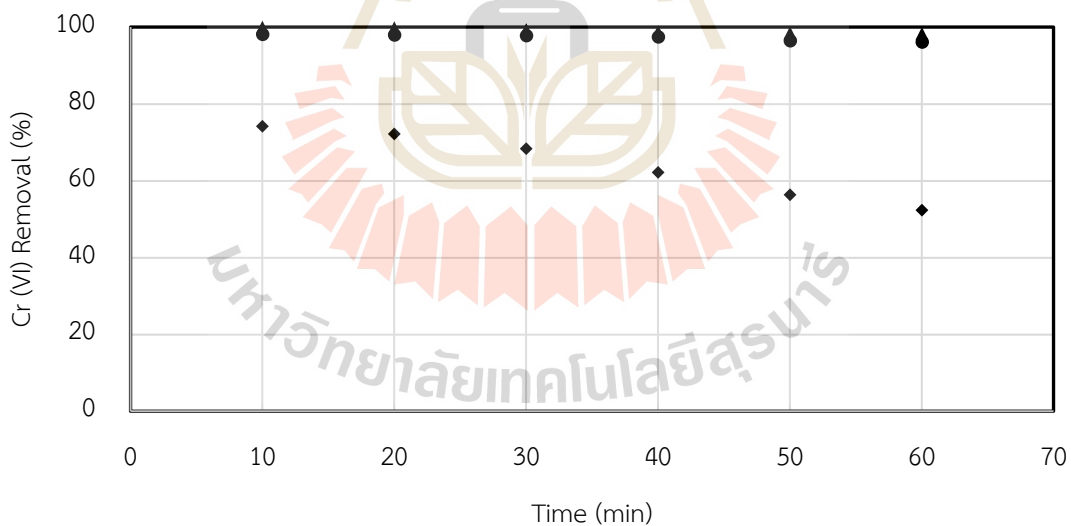
รูปที่ 4.13 ผลกระทบของค่าแรงดันรีเทนเทตต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์

#### 4.5.3 การแปรผันสัดส่วนมวลของ Cr (VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์

จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.14 พบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.9 ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10 และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.1 และ 74.1 เมื่ออัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์เท่ากับ 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ โดยพบค่าความเข้มข้นของ Cr(VI) ในน้ำออกจากระบบอัลตราฟิวเตรชั่นเท่ากับ 0.1 mg/L 0.3 mg/L และ 5.2 mg/L ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:10 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) จะ

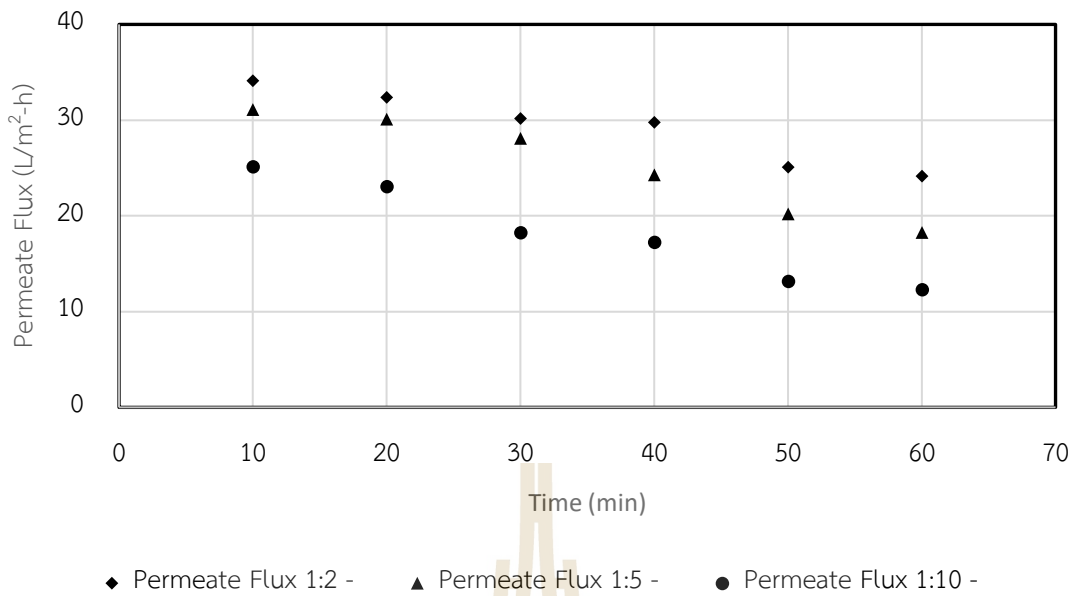
เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างโครเมียมและแป้งโมดิฟายด์เกิดสูงขึ้นทำให้เกิดการดูดซับไอออนของ Cr(VI) ทางเคมีไว้บนผิวสัมผัสของแป้งโมดิฟายด์ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรนระดับอัลตราฟิวเตรชั่น ดังนั้นกลไกในการกำจัด Cr(VI) ของระบบนี้คือการดูดซับสารละลาย Cr(VI) ด้วยกลไกทางเคมีด้วยแป้งโมดิฟายด์และแยกออกจากน้ำเสียด้วยการกรองระดับอัลตราฟิวเตรชั่น ซึ่งสอดคล้องในการศึกษาของ [Aliane et al. \(2001\)](#) [Bade et al. \(2008\)](#) และ [Yenphan et al. \(2010\)](#) โดยใช้โพลีเมอร์เป็นตัวดูดซับโครเมียมแล้วจึงแยกออกจากน้ำเสียด้วยระบบอัลตราฟิวเตรชั่น และ [Beak et al. \(2007\)](#) ซึ่งทำการศึกษากการดูดซับโลหะหนักด้วยแป้งแคทไอออนและแยกออกด้วยเยื่อกรองระดับอัลตราฟิวเตรชั่น

แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการกรองเมื่อมีการเพิ่มมวลของแป้งหรือตัวดูดซับซึ่งเป็นสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ทำให้เพิ่มการอุดตันหน้าผิวของเมมเบรนดังผลการศึกษาในรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของค่าเพอมีเอทฟลักซ์เมื่อมวลของแป้งโมดิฟายด์เพิ่มขึ้นโดยพบค่าเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 34.1 L/m<sup>2</sup>-h 31.1 L/m<sup>2</sup>-h และ 25.2 L/m<sup>2</sup>-h ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ 1:2 1:5 และ 1:10 ตามลำดับ ดังนั้นในการพิจารณาความเหมาะสมในการออกแบบระบบกำจัดโลหะด้วยแป้งโมดิฟายด์และระบบอัลตราฟิวเตรชั่นจำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดและความเหมาะสมในการเดินระบบ ซึ่งในการศึกษานี้พบค่าอัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป้งโมดิฟายด์ที่มีความเหมาะสมคือ 1:5



◆ Cr (VI) Removal (%) 1:2 - ● Cr (VI) Removal (%) 1:5 - ▲ Cr (VI) Removal (%) 1:10 -

รูปที่ 4.14 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI)



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลต่อค่าเพอเมอแฟล็กซ์

#### 4.5.4 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้ง

การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้งทำการศึกษาโดยการวัดค่าซีโอดีในน้ำออกจากระบบอัลตราฟิลเตรชันพบว่า ในทุกๆรอบของการเดินระบบกำจัด Cr (VI) ด้วยแบงก์โมดิฟายด์และอัลตราฟิลเตรชันพบค่าซีโอดีน้อยกว่า 20 mg/L ดังรายละเอียดของผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งเกิดเนื่องจากโมเลกุลของแบงก์มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรนนั่นเอง

ตารางที่ 4.4 การปนเปื้อนความสกปรกในน้ำทิ้งจากระบบอัลตราฟิลเตรชัน

การเดินระบบ	SCOD (mg/L)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เพอเมอแฟล็กซ์เริ่มต้น 50 L/m <sup>2</sup> -h	0.1	0.02
เพอเมอแฟล็กซ์เริ่มต้น 40 L/m <sup>2</sup> -h	0.5	0.17
เพอเมอแฟล็กซ์เริ่มต้น 30 L/m <sup>2</sup> -h	6.6	2.34
อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแบงก์โมดิฟายด์ 1:10	0.1	0.02
อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแบงก์โมดิฟายด์ 1:5	0.3	0.13
อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแบงก์โมดิฟายด์ 1:2	5.2	1.11

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยแอมโมเนียมฟอสเฟต ทำการศึกษาโดยใช้แอมโมเนียมฟอสเฟตเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ประกอบด้วย Cu (II) Ni (II) Pb (II) และ Cr (VI) สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ผลการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของแอมโมเนียมฟอสเฟตที่สภาวะสมดุลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาที ความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.41 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม

5.1.2 ผลการแปรเปลี่ยนปริมาณแอมโมเนียมฟอสเฟต พบว่าที่ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น Cu (II) 0.13 นอร์มอลลิตี Ni (II) 0.0008 นอร์มอลลิตี Pb (II) 0.14 นอร์มอลลิตี และ Cr (VI) 0.75 นอร์มอลลิตี แอมโมเนียมฟอสเฟต 0.1 กรัม สามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงสุด เท่ากับ 0.38 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม

5.1.3 แอมโมเนียมฟอสเฟตสามารถดูดซับ Cr (VI) ได้มากที่สุด รองลงมาคือ Pb (II) Cu (II) และไม่เกิดการดูดซับ Ni (II) ที่สารละลายพีเอช 5.5 เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของแอมโมเนียมฟอสเฟตเป็นหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ จึงเกิดการสร้างพันธะกับ Cr (VI) ที่อยู่ในรูป  $\text{HCrO}_4^-$  ในสารละลายพีเอช 5.5 เป็นส่วนใหญ่ และโลหะหนักประจุบวกสอง จะเกิดการสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันอื่น หรือหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่มีประจุเป็นกลางมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทำหน้าที่เป็นลิแกนด์สร้างพันธะกับไอออนของ Pb (II) Cu (II) และ Ni (II) ซึ่ง Pb (II) มีค่า electro-selectivity สูงกว่า Cu (II) และ Ni (II) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) มากกว่า Pb (II) มากกว่า CU (II) และมากกว่า Ni (II)

5.1.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักด้วยแอมโมเนียมฟอสเฟต สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order model) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี ของการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับไอออนของโลหะหนัก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการแพร่ของไอออนโลหะหนักไปยังพื้นที่ผิวของแอมโมเนียมฟอสเฟต ความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณได้เท่ากับ 0.43 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองที่จุดสมดุลซึ่งเท่ากับ 0.46 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม และอัตราเร็วในการดูดซับช่วงเริ่มต้นคำนวณจากสมการ  $h=k_2q_e^2$  เท่ากับ 2.66 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมต่อนาที

5.1.5 ค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยแป่งแคทไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม มีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของการศึกษาอื่นๆ ที่ผ่านมา ดังนั้นแป่งแคทไอออนจึงมีแนวโน้มสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำได้

## 5.2 การศึกษาศึกษาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการดูดซับด้วยแป่งโมดิฟายด์

ทำการศึกษาโดยใช้แป่งอะมิโนเป็นตัวดูดซับ และทำการติดตั้งชุดทดลองระบบดูดซับร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อนของ Cr (VI) ทำการศึกษาประสิทธิภาพดูดซับ Cr (VI) ด้วยแป่งโมดิฟายด์และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ UF ทำการศึกษาโดยการแปรผันเพอมีเอทพลักซ์ การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท และความเข้มข้นของแป่งโมดิฟายด์ โดยมีรายละเอียดในการศึกษาโดยสรุปดังต่อไปนี้

- การศึกษาผลกระทบของค่าเพอมีเอทพลักซ์เริ่มต้นพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 94 ที่ค่าเพอมีเอทพลักซ์เริ่มต้น 50 L/m<sup>2</sup>.h และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเมื่อค่าเพอมีเอทพลักซ์เริ่มต้นลดลงโดยพบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 84 และร้อยละ 72 ที่ค่าเพอมีเอทพลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 40 L/m<sup>2</sup>.h และ 30 L/m<sup>2</sup>.h ตามลำดับ
- การศึกษาการแปรผันแรงดันรีเทนเททพบว่าเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 85 ที่ค่าแรงดันรีเทนเทท 0.2 MPa และลดลงโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80 และร้อยละ 76 ที่ค่าแรงดันรีเทนเททเท่ากับ 0.18 MPa และ 0.14 MPa ตามลำดับ โดยเมื่อแรงดันรีเทนเททเพิ่มขึ้นตัวดูดซับจะเกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงกว่า Bulk solution ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันรีเทนเทท
- การแปรผันสัดส่วนมวลของ Cr (VI) ต่อแป่งโมดิฟายด์ พบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.9 ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป่งโมดิฟายด์ 1:10 และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(VI) มีค่าลดลงเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.1 และ 74.1 เมื่ออัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป่งโมดิฟายด์เท่ากับ 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ โดยพบค่าความเข้มข้นของ Cr(VI) ในน้ำออกจากระบบอัลตราฟิลเตรชันเท่ากับ 0.1 mg/L 0.3 mg/L และ 5.2 mg/L ที่อัตราส่วนมวลของ Cr(VI) ต่อแป่งโมดิฟายด์ 1:10 1:5 และ 1:2 ตามลำดับ

## เอกสารอ้างอิง

มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2554). **อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง** (online).

Available: <http://www.tapiocathai.org/E4.html>.

รัตนา จิรรัตนานนท์ (2543). กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พัชรินทร์ ราโช (2554) รายงานวิจัย: **การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโครเมียม (VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์**. ทูลอดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abia, A. A., Horsfall Jr, M. and Didi, O. (2003). The use of chemically modified and unmodified cassava waste for removal of Cd, Cu and Zn ions from aqueous solution. **Bioresource Technology**. 90: 345-348.

Aroua, M. K., Zuki, F. H. and Sulaiman, N. M. (2007). Removal of chromium ions from aqueous solutions by polymer-enhanced ultrafiltration. **Journal of Hazardous Materials**. 147: 752-758.

Bade, R., Lee, S. H., Jo, S., Lee, H. and Lee, S. (2008). Micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) and activated carbon fibre (ACF) hybrid process for chromate removal from wastewater. **Desalination**. 229: 264-278.

Balkaya, N. and Cesur, H. (2008). [Adsorption of cadmium from aqueous solution by phosphogypsum](#). **Chemical Engineering Journal**. 140 (1-3): 247-254.

Beak, K. and Yong, J. (2004). Cross-flow micellar-enhanced ultrafiltration for removal of nitrate and chromate: competitive binding. **Journal Hazardous Materials**. B108: 119-123.

Beak, K., Kim, B. and Yang, J. (2003). Application micellar enhanced ultrafiltration for nutrients removal. **Desalination**. 156: 137-144.

Beak, K., Yang, J., Kwon, T and Yang, J. (2007). Cation starch-enhanced ultrafiltration for Cr (VI) removal. **Desalination**. 206: 245-250.



- Beak, K. , Yang, Jung-Seok and Yang, Ji-Won. ( 2004) . Cationic starch enhanced ultrafiltration for nutrient removal. **International Conference on Wastewater Treatment for Nutrient Removal and Reuse 2004**. Asian Institute of Technology. Thailand.
- Bohdziewicz, J. (2000). Removal of Chromium ions (VI) from underground water in the hybrid complexation-ultrafiltration process. **Desalination**. 129: 227-235.
- Chen, Y., Lui, S. and Wang, G. (2007). A kinetic investigation of cationic starch adsorption and flocculation in kaolin suspension. **Chemical Engineering Journal**. 133: 325-333.
- Cheng, R., Ou, S., Xiang, B., Li, Y. and Liao, Q. (2009). Adsorption behavior of hexavalent chromium on synthesized ethylenediamine modified starch. **Journal of Polymer Research**. 16: 703-708.
- Connell, D. W., Birkinshaw, C. and O’Dwyer, T. F. (2008). Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review. **Bioresource**. 99: 6709-6724.
- Dong, A., Xie, J., Wang, W., Yu, L., Lui, Q. and Yin, Y. (2010). A novel method for amino starch preparation and its adsorption for Cu (II) and Cr (VI). **Journal of Hazardous Materials**. 181: 448-454.
- Ghosh, G. and Bhattacharya, P. K. (2006). Hexavalent chromium ion removal through micellar enhanced ultrafiltration. **Chemical Engineering Journal**. 119: 45-53.
- Kim, H. Beak, K., Lee, Iqbal, J. and Yang, J. (2006). Comparison of separation methods of heavy metal from surfactant micellar solutions for the recovery of surfactant. **Desalination**. 191: 186-192.
- Klimaviciute, R., Bendoraitiene, J., Rutkaite, R. and Zenmaitatis, A. (2010). Adsorption of hexavalent chromium on cationic cross-linked starches of different botanic origins. **Journal of Hazardous Material**. 181: 624-632.
- Korus, I. and Loska, K. (2009). Removal of Cr (III) and Cr (VI) ions from aqueous solutions by means of polyelectrolyte-enhanced ultrafiltration. **Desalination**. 247: 390-395.

- Kozłowski, C.A., Walkowiak, W. (2002). Removal of chromium(VI) from aqueous solutions by polymers inclusion membranes. **Water Research**. 36: 4870–4876.
- Kweon, D. K. and Choi, J. K. (2001). Adsorption of divalent metal ions by succinylated and oxidized corn starches. **Carbohydrate Polymer**. 46: 171-177.
- Metcalf, Eddy, 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, fourth ed. McGraw-Hill, Inc., New York.
- Nichiffor, M., Cristina, M., Stanciu, C. and Simionescu. (2010). New cationic hydrophilic and amphiphilic polysaccharides synthesized by one pot procedure. **Carbohydrate Polymer**. 82: 965-975.
- Pagana, A. E., Sklari, S. D., Kikkinides, E. S. and Zaspalis, V. T. (2008). Microporous ceramic membrane technology for the removal of arsenic and chromium ions from contaminated water. **Microporous and Mesoporous Materials**. 110: 150-156.
- Xu, S. M., Feng, G., Peng, G. and Wang, J. D. (2004). Adsorption of Zn (II) ion onto crosslinked amphoteric starch in aqueous solutions. **Journal of Polymer Research**. 11: 1212-1217.
- Yenphan, P., Chanachai, A. and Jiratananon, R. (2010). Experimental study on micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) of aqueous solution and wastewater containing lead ion with mixed surfactants. **Desalination**. 233: 30-37.
- Zamariotto, D., Lakard., B. and Fatin-Rouge, N. (2010). Retention of Cu (II)-and Ni (II) – polyaminocarboxylate complexes by ultrafiltration assisted with polyamines. **Desalination**. 258: 87-92.
- Zhang L. M. and Chen, D. Q. (2002). An investigation of adsorption of lead (II) and copper (II) ions by water-insoluble starch graft copolymers. **Colloids Surf**. A205: 231-236.
- Ciosek AL, Luk GK. (2017). Kinetic Modelling of the Removal of Multiple Heavy Metallic Ions from Mine Waste by Natural Zeolite Sorption. **Water**. 9(7):482.

- Don, A., Xie J., Wan, W., Yu L., Liu Q., and Yin Y. (2010). A novel method for amino starch preparation and its adsorption for Cu(II) and Cr(VI). **Journal of Hazardous Materials** 181(1–3), 448-454.
- Gerić M, Gajski G, Oreščanin V, Domijan A.M, Kollar R, Vera G.V, (2017). Environmental risk assessment of wastewaters from printed circuit board production: A multibiomarker approach using human cells, **Chemosphere** 168; 1075-1081.
- Chang L.Y, (2001). CHROME REDUCTION AND HEAVY METALS REMOVAL FROM WASTEWATER – A POLLUTION PREVENTION APPROACH. **WM'01 Conference**, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ.
- Guo-xiu Xing, Shu-fen Zhang, Ben-zhi Ju, Jin-zong Yang,. (2006). Study on adsorption behavior of crosslinked cationic starch maleate for chromium (VI), **Carbohydrate Polymers** 66 (2); 246-251.
- Guoren Xie, Xiaoqin Shang, Rufeng Liu, Jing Hu, Shifang Liao. (2011). Synthesis and characterization of a novel amino modified starch and its adsorption properties for Cd(II) ions from aqueous solution. **Carbohydrate Polymers** 84; 430–438.
- Aiqin Dong, Jie Xie, Wenmin Wang, Liping Yu, Qian Liu, Yeping Yin. (2010). A novel method for amino starch preparation and its adsorption for Cu(II) and Cr(VI). **Journal of Hazardous Materials** 181; 448–454.
- Qing Liu, Fang Li, Hao Lu, Man Li, Jing Liu, Shuangling Zhang, Qingjie Sun, Liu Xiong. (2018). Enhanced dispersion stability and heavy metal ion adsorption capability of oxidized starch nanoparticles. **Food Chemistry** 242; 256-263.

ภาคผนวก ก



ตารางที่ ก1 ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

Sample	Time (min)	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)
1	2	0.1057	0.128	0.058	54.43	0.03	0.235	0.007	7.23	0.00
2	2	0.104		0.062	51.66	0.03	0.008		2.13	0.00
average.					53.05	0.03			4.68	0.00
SD.					1.95	0.00			3.61	0.00
1	4	0.1028		0.058	54.67	0.03		0.007	8.94	0.00
2	4	0.1026		0.059	53.54	0.03	0.008		2.98	0.00
average.					54.11	0.03			5.96	0.00
SD.					0.80	0.00			4.21	0.00
1	6	0.1026		0.056	55.86	0.03		0.008	5.53	0.00
2	6	0.1023		0.06	53.09	0.03	0.008		5.53	0.00
average.					54.48	0.03			5.53	0.00
SD.					1.95	0.00			0.00	0.00

ตารางที่ ก1 ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)
1	8	0.1026		0.06	53.29	0.03		0.018	0.00	0.00
2	8	0.1015		0.065	48.71	0.03		0.009	0.00	0.00
average.					51.00	0.03			0.00	0.00
SD.					3.24	0.00			0.00	0.00
1	10	0.1012	0.128	0.124	2.98	0.00	0.245	0.009	0.00	0.00
2	10	0.1015		0.123	3.75	0.00		0.009	0.00	0.00
3	10	0.1004		0.126	1.23	0.00		0.009	0.00	0.00
average.					2.66	0.00			0.00	0.00
SD.					1.29	0.00			0.00	0.00
1	20	0.1034		0.119	6.44	0.00		0.009	0.00	0.00
2	20	0.1009		0.122	4.09	0.00		0.009	0.00	0.00
3	20	0.1055		0.128	0	0.00		0.009	0.00	0.00
average.					5.27	0.00			0.00	0.00
SD.					1.66	0.00			0.00	0.00

ตารางที่ ก1 ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)
1	30	0.1031		0.09	29.40	0.02		0.007	0.00	0.00
2	30	0.1052		0.119	6.93	0.00		0.01	0.00	0.00
3	30	0.1038		0.125	2.37	0.00		0.009	0.00	0.00
average.					4.65	0.01			0.00	0.00
SD.					3.23	0.01			0.00	0.00
1	40	0.105		0.118	7.50	0.00		0.008	5.31	0.00
2	40	0.1041		0.127	0.52	0.00		0.008	0.00	0.00
3	40	0.1053		0.121	4.81	0.00		0.009	0.00	0.00
average.					6.15	0.00			1.77	0.00
SD.					1.90	0.00			3.06	0.00
1	60	0.1028		0.118	7.52	0.00		0.008	3.27	0.00
2	60	0.1008		0.13	0	0.00		0.009	-2.45	0.00
3	60	0.1003		0.138	0	-0.01		0.009	-2.86	0.00
average.					7.52	0.00			0.00	0.00
SD.						0.01			3.42	0.00

ตารางที่ ก1 ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)
1	80	0.1023		0.115	10.11	0.01		0.008	6.94	0.00
2	80	0.1012		0.108	15.71	0.01		0.008	0.00	0.00
3	80	0.1015		0.133	0	0.00		0.008	0.00	0.00
average.					12.91	0.00			2.31	0.00
SD.					3.96	0.01			4.01	0.00
1	100	0.1038		0.091	28.31	0.02		0.008	4.90	0.00
2	100	0.1016		0.128	0	0.00		0.009	0.00	0.00
3	100	0.1023		0.137	0	0.00		0.008	1.63	0.00
average.					28.31	0.02			2.18	0.00
SD.					4.93	0.01			2.49	0.00
1	120	0.104		0.088	31.39	0.02		0.006	26.94	0.00
2	120	0.1012		0.1	21.58	0.01		0.008	1.63	0.00
3	120	0.1012		0.123	3.92	0.00		0.008	-0.82	0.00
average.					26.49	0.01			9.25	0.00
SD.					6.94	0.01			15.37	0.00



ตารางที่ ก1 ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	qe (meq/g)
1	150	0.1016		0.119	6.49	0.00		0.008	6.12	0.00
2	150	0.1017		0.094	26.26	0.02		0.008	3.27	0.00
3	150	0.1		0.099	22.19	0.01		0.008	0.00	0.00
average.					18.31	0.01			3.13	0.00
SD.					10.44	0.01			3.06	0.00
1	180	0.1028		0.055	57.29	0.04		0.007	14.69	0.00
2	180	0.103		0.113	11.25	0.01		0.008	0.82	0.00
3	180	0.1026		0.113	11.17	0.01		0.008	1.22	0.00
average.					11.21	0.02			5.58	0.00
SD.					0.05	0.02			7.90	0.00

ตารางที่ ก2 ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

Sample	Time (min)	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)
1	2	0.1057	0.1401	0.0001	99.95	0.07	0.7558	0.0293	99.55	0.34	1.0316	0.0950	90.79	0.44
2	2	0.104		0.0085	93.91	0.06		0.0627	99.04	0.33		0.1407	86.36	0.43
average.					96.93	0.06			99.30	0.34			88.58	0.44
SD.					4.28	0.00			0.36	0.01			3.14	0.01
1	4	0.1028		0.0001	99.94	0.07		0.0276	99.58	0.35		0.0928	91.00	0.46
2	4	0.1026		0.0000	99.97	0.07		0.0270	99.59	0.36		0.0941	90.88	0.46
average.					99.95	0.07			99.58	0.35			90.94	0.46
SD.					0.02	0.00			0.01	0.00			0.09	0.00
1	6	0.1026		0.0001	99.95	0.07		0.0254	99.61	0.36		0.0894	91.34	0.46
2	6	0.1023		0.0000	99.97	0.07		0.0268	99.59	0.36		0.0942	90.87	0.46
average.					99.96	0.07			99.60	0.36			91.10	0.46

SD.					0.01	0.00			0.01	0.00			0.33	0.00
1	8	0.102 6		0.0004	99.70	0.07		0.0264	99.60	0.36		0.1044	89.88	0.45
2	8	0.101 5		0.0001	99.94	0.07		0.0269	99.59	0.36		0.1019	90.12	0.46
average.					99.82	0.07			99.59	0.36			90.00	0.45
SD.					0.17	0.00			0.00	0.00			0.17	0.00

ตารางที่ ก2 ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)
1	10	0.101 2	0.1542	0.0016	98.95	0.08	0.2564	0.0699	98.95	0.34		0.2048	80.15	0.41
2	10	0.101 5		0.0012	99.24	0.08		0.0674	98.99	0.34		0.2006	80.55	0.41
3	10	0.100 4		0.0091	94.12	0.07		0.0928	98.61	0.33		0.2369	77.03	0.40
average.					99.10	0.07			98.85	0.34			79.25	0.40
SD.					0.20	0.00			0.21	0.01			1.93	0.01

1	20	0.103 4		0.0010	99.32	0.07		0.0658	99.01	0.33		0.1950	81.10	0.40
2	20	0.100 9		0.0012	99.22	0.08		0.0676	98.99	0.34		0.2000	80.61	0.41
3	20	0.105 5		0.0012	99.24	0.07		0.0597	99.10	0.33		0.1978	80.82	0.40
average.					99.26	0.07			99.03	0.33			80.84	0.40
SD.					0.05	0.00			0.06	0.01			0.25	0.01
1	30	0.103 1		0.0007	99.54	0.07		0.0463	99.31	0.34		0.1437	86.07	0.43
2	30	0.105 2		0.0007	99.54	0.07		0.0539	99.19	0.33		0.1838	82.18	0.40
3	30	0.103 8		0.0010	99.36	0.07		0.0598	99.10	0.34		0.1939	81.21	0.40
average.					99.48	0.07			99.20	0.34			83.15	0.41
SD.					0.10	0.00			0.10	0.01			2.58	0.02

ตารางที่ ก2 ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)
1	40	0.105		0.0072	95.35	0.07		0.0433	99.35	0.34		0.1764	82.90	0.41
2	40	0.104 1		0.0042	97.29	0.07		0.0939	98.59	0.32		0.2335	77.36	0.38
3	40	0.105 3		0.0052	96.63	0.07		0.0000	100.00	0.36		0.1352	86.89	0.43
average.					96.96	0.07			98.97	0.33			82.38	0.41
SD.					0.47	0.00			0.54	0.02			4.78	0.02
1	60	0.102 8		0.0015	99.04	0.07		0.0563	99.16	0.34		0.1839	82.17	0.41
2	60	0.100 8		0.0007	99.52	0.08		0.0467	99.30	0.35		0.1863	81.94	0.42
3	60	0.100 3		0.0009	99.44	0.08		0.0567	99.15	0.35		0.2044	80.19	0.41
average.					99.33	0.08			99.20	0.35			81.43	0.41
SD.					0.26	0.00			0.08	0.01			1.09	0.00

1	80	0.102 3		0.0006	99.58	0.08		0.0547	99.18	0.34		0.1778	82.76	0.42
2	80	0.101 2		0.0040	97.39	0.07		0.0466	99.30	0.35		0.1666	83.85	0.43
3	80	0.101 5		0.0017	98.92	0.08		0.0636	99.05	0.34		0.2062	80.01	0.41
average.					98.63	0.07			99.18	0.34			82.21	0.42
SD.					1.12	0.00			0.13	0.01			1.98	0.01

ตารางที่ ก2 ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)
1	100	0.103 8		0.0002	99.89	0.07		0.0467	99.30	0.34		0.1463	85.81	0.43
2	100	0.101 6		0.0003	99.82	0.08		0.0569	99.15	0.34		0.1938	81.21	0.41
3	100	0.102 3		0.0006	99.61	0.08		0.0757	98.86	0.33		0.2216	78.52	0.40
average.					99.77	0.08			99.10	0.34			81.85	0.41

SD.					0.15	0.00			0.22	0.01			3.69	0.02
1	120	0.104		0.0003	99.83	0.07		0.0392	99.41	0.34		0.1332	87.09	0.43
2	120	0.101 2		0.0036	97.69	0.07		0.0577	99.13	0.34		0.1696	83.56	0.43
3	120	0.101 2		0.0006	99.60	0.08		0.0553	99.17	0.35		0.1869	81.88	0.42
average.					99.04	0.07			99.24	0.35			84.18	0.43
SD.					1.18	0.00			0.15	0.00			2.66	0.01
1	150	0.101 6		0.0036	97.64	0.07		0.1042	98.44	0.32		0.2350	77.22	0.39
2	150	0.101 7		0.0006	99.58	0.08		0.0546	99.18	0.34		0.1574	84.74	0.43
3	150	0.1 0.1		0.0067	95.65	0.07		0.0725	98.91	0.34		0.1869	81.88	0.42
average.					97.62	0.07			98.84	0.34			81.28	0.41
SD.					1.97	0.00			0.38	0.01			3.80	0.02

ตารางที่ ก2 ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ (ต่อ)

Sample	Time (min)	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
			C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)	C0 (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/g)
1	180	0.102 8		0.0038	97.56	0.07		0.0494	99.26	0.34		0.1148	88.87	0.45
2	180	0.103		0.0020	98.72	0.07		0.1272	98.09	0.31		0.2507	75.70	0.38
3	180	0.102 6		0.0004	99.72	0.07		0.0575	99.14	0.34		0.1795	82.60	0.42
average.					98.67	0.07			99.20	0.33			82.39	0.41
SD.					1.08	0.00			0.09	0.02			6.59	0.03



ตารางที่ 3ก ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ปริมาณแ่งต่างๆ

Sample	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
1	0.1047	0.084	0.0616	26.43	0.01	0.0080	0.0066	17.02	0.00
2	0.1007		0.0621	25.86	0.01		0.0065	18.30	0.00
3	0.1019		0.0610	27.14	0.01		0.0068	14.47	0.00
average.			0.0616	26.48	0.01		0.0067	16.60	0.00
SD.				0.64	0.00			1.95	0.00
4	0.2004		0.0449	46.39	0.01		0.0062	22.98	0.00
5	0.2023		0.0454	45.83	0.01		0.0065	19.15	0.00
6	0.2031		0.0473	43.53	0.01		0.0062	22.13	0.00
average.			0.0458	46.11	0.01		0.0063	21.42	0.00
SD.				0.40	0.00			2.01	0.00
7	0.3007		0.0414	50.56	0.01		0.0071	11.06	0.00
8	0.3028		0.0415	50.49	0.01		0.0073	8.94	0.00
9	0.3001		0.0419	49.92	0.01		0.0073	8.51	0.00
average.			0.0416	50.21	0.01		0.0072	9.50	0.00
SD.				0.40	0.00			1.37	0.00

ตารางที่ 3ก ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ปริมาณแ่งต่างๆ

Sample	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
10	0.4027		0.0394	52.97	0.01		0.0070	13.19	0.00
11	0.4005		0.0408	51.32	0.01		0.0075	6.81	0.00
12	0.4009		0.0410	51.02	0.01		0.0075	6.38	0.00
average.			0.0404	51.99	0.01		0.0073	8.79	0.00
SD.				1.38	0.00			3.81	0.00
13	0.5005		0.0393	53.01	0.00		0.0073	9.36	0.00
14	0.5		0.0383	54.29	0.00		0.0076	5.53	0.00
15	0.5028		0.0401	52.07	0.00		0.0074	7.66	0.00
average.			0.0392	53.01	0.00		0.0074	7.52	0.00
SD.					0.00			1.92	0.00
16	0.6031		0.0402	51.95	0.00		0.0070	13.19	0.00
17	0.6028		0.0403	51.84	0.00		0.0072	10.64	0.00
18	0.6042		0.0415	50.49	0.00		0.0075	6.81	0.00
average.			0.0407	51.43	0.00		0.0072	10.21	0.00
SD.				0.82	0.00			3.21	0.00

ตารางที่ 3ก ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ปริมาณแ่งต่างๆ

Sample	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
19	0.7019		0.0403	51.84	0.00		0.0070	12.34	0.00
20	0.701		0.0396	52.74	0.00		0.0075	6.81	0.00
21	0.7038		0.0415	50.41	0.00		0.0081	0	0.00
average.			0.0405	52.29	0.00		0.0075	5.96	0.00
SD.				0.64	0.00			6.85	0.00
22	0.8036		0.0426	49.17	0.00		0.0072	10.64	0.00
23	0.8007		0.0415	50.38	0.00		0.0073	8.51	0.00
24	0.8025		0.0413	50.68	0.00		0.0075	5.96	0.00
average.			0.0418	49.17	0.00		0.0073	8.37	0.00
SD.				0.21	0.00			2.34	0.00
25	0.9007		0.0369	55.94	0.00		0.0070	12.77	0.00
26	0.9003		0.0457	45.45	0.00		0.0073	8.51	0.00
27	0.9017		0.0440	47.48	0.00		0.0073	8.51	0.00
average.			0.0422	50.70	0.00		0.0072	9.93	0.00
SD.				7.42	0.00			2.46	0.00

ตารางที่ 3ก ความเข้มข้น Cu (II) และ Ni (II) ที่ปริมาณแ่งต่างๆ

Sample	Weight (g)	Cu (II)				Ni (II)			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
28	1.0022		0.0415	50.41	0.00		0.0070	13.19	0.00
29	1.0027		0.0465	44.47	0.00		0.0072	10.64	0.00
30	1.0018		0.0437	47.86	0.00		0.0075	6.81	0.00
average.			0.0439	47.58	0.00		0.0072	10.21	0.00
SD.				2.98	0.00			3.21	0.00

ตารางที่ 4ก ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ปริมาณแบ่งต่างๆ

Sample	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
1	0.1047	0.1156	0.0003	99.71	0.06	0.659	0.023	99.59	0.30	0.8662	0.092	89.41	0.37
2	0.1007		0.0004	99.62	0.06		0.030	99.47	0.31		0.099	88.56	0.38
3	0.1019		0.0006	99.47	0.06		0.028	99.52	0.31		0.096	88.91	0.38
average.			0.0005	99.66	0.06		0.027	99.53	0.31			88.96	0.38
SD.				0.07	0.00			0.06	0.00			0.42	0.01
4	0.2004		0.0009	99.18	0.03		0.022	99.61	0.16		0.074	91.41	0.20
5	0.2023		0.0014	98.83	0.03		0.023	99.61	0.16		0.076	91.26	0.20
6	0.2031		0.0012	98.99	0.03		0.024	99.57	0.16		0.079	90.86	0.19
average.			0.0012	99.00	0.03		0.023	99.60	0.16			91.18	0.20
SD.				0.18	0.00			0.02	0.00			0.28	0.00
7	0.3007		0.0006	99.44	0.02		0.020	99.64	0.11		0.070	91.97	0.13
8	0.3028		0.0010	99.11	0.02		0.022	99.61	0.11		0.072	91.71	0.13
9	0.3001		0.0009	99.20	0.02		0.021	99.63	0.11		0.072	91.74	0.13
average.			0.0009	99.25	0.02		0.021	99.63	0.11			91.81	0.13
SD.				0.17	0.00			0.01	0.00			0.14	0.00
10	0.4027		0.0014	98.79	0.01		0.022	99.61	0.08		0.070	91.93	0.10
11	0.4005		0.0013	98.86	0.01		0.023	99.60	0.08		0.072	91.66	0.10
12	0.4009		0.0013	98.84	0.01		0.023	99.60	0.08		0.072	91.63	0.10
average.			0.0014	98.85	0.01		0.023	99.61	0.08			91.74	0.10

ตารางที่ 4ก ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ปริมาณแบ่งต่างๆ (ต่อ)

Sample	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
SD.				0.02	0.00			0.01	0.00			0.17	0.00
13	0.5005		0.0015	98.72	0.01		0.021	99.64	0.06		0.069	92.08	0.08
14	0.5		0.0032	97.23	0.01		0.034	99.41	0.06		0.083	90.44	0.08
15	0.5028		0.0016	98.59	0.01		0.021	99.64	0.06		0.070	91.94	0.08
average.			0.0021	98.18	0.01		0.025	99.56	0.06			91.49	0.08
SD.				0.82	0.00			0.13	0.00			0.91	0.00
16	0.6031		0.0022	98.11	0.01		0.020	99.64	0.05		0.070	91.96	0.07
17	0.6028		0.0069	94.07	0.01		0.038	99.34	0.05		0.092	89.40	0.06
18	0.6042		0.0067	94.22	0.01		0.032	99.45	0.05		0.087	89.93	0.06
average.			0.0052	95.47	0.01		0.030	99.48	0.05			90.43	0.06
SD.				2.29	0.00			0.15	0.00			1.35	0.00
19	0.7019		0.0009	99.26	0.01		0.017	99.71	0.05		0.065	92.51	0.06
20	0.701		0.0014	98.81	0.01		0.021	99.63	0.05		0.069	92.00	0.06
21	0.7038		0.0014	98.75	0.01		0.019	99.67	0.05		0.070	91.91	0.06
average.			0.0012	98.94	0.01		0.019	99.67	0.05			92.14	0.06
SD.				0.28	0.00			0.04	0.00			0.32	0.00
22	0.8036		0.0030	97.43	0.01		0.023	99.60	0.04		0.076	91.25	0.05
23	0.8007		0.0074	93.62	0.01		0.040	99.31	0.04		0.096	88.94	0.05
24	0.8025		0.0038	96.70	0.01		0.034	99.41	0.04		0.087	90.01	0.05

ตารางที่ 4ก ความเข้มข้น Pb (II) และ Cr (VI) ที่ปริมาณแบ่งต่างๆ (ต่อ)

Sample	Weight (g)	Pb (II)				Cr (VI)				[Total]			
		Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)	Co (meq/L)	C1 (meq/L)	%removal	q (meq/L)
average.			0.0047	95.92	0.01		0.032	99.44	0.04			90.07	0.05
SD.				2.02	0.00			0.15	0.00			1.16	0.00
25	0.9007		0.0010	99.16	0.01		0.017	99.70	0.04		0.062	92.84	0.04
26	0.9003		0.0016	98.62	0.01		0.020	99.65	0.04		0.074	91.42	0.04
27	0.9017		0.0013	98.85	0.01		0.019	99.67	0.04		0.071	91.75	0.04
average.			0.0013	98.87	0.01		0.019	99.67	0.04			92.00	0.04
SD.				0.27	0.00			0.02	0.00			0.74	0.00
28	1.0022		0.0022	98.11	0.01		0.020	99.64	0.03		0.071	91.81	0.04
29	1.0027		0.0069	94.07	0.01		0.038	99.34	0.03		0.098	88.69	0.04
30	1.0018		0.0067	94.22	0.01		0.032	99.45	0.03		0.089	89.68	0.04
average.			0.0052	95.47	0.01		0.030	99.48	0.03			90.06	0.04
SD.				2.29	0.00			0.15	0.00			1.59	0.00

ภาคผนวก ข





## ประวัติผู้วิจัย

ผศ.ดร. พัชรินทร์ราโช

เลขที่บัตรประชาชน 3450400071089

สถานที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์ 044-224-565 โทรสาร 044-224-606 E-mail:  
[patcha@sut.ac.th](mailto:patcha@sut.ac.th)

การศึกษา *วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต* สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
*วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต* สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
*วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต* สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

### ประสบการณ์การทำงาน

ก.ย. 2541 – ก.ย. 2542 ผู้ช่วยวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ก.ย. 2545 – พ.ย. 2547 Technical Engineer บริษัท ไฮโดรโซน จำกัด  
ธ.ค. 2547 - ธ.ค. 2548 Senior Product Engineer  
บริษัท ทอปริชคอร์ปอเรชั่น จำกัด  
ม.ค. 2548 – ก.พ. 2549 Data & Technical Engineering Manager  
บริษัท ทอปริชคอร์ปอเรชั่น จำกัด  
ม.ค. 2549 – พ.ย. 2551 ที่ปรึกษาบริษัท ทอปริชคอร์ปอเรชั่น จำกัด  
พ.ย. 2551– พ.ค. 2552 Engineering Manager บริษัท ครีเอชั่นเซ็นเตอร์  
จำกัด  
ก.ค. 2553 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
สุรนารี

### บทความ

1. Racho, P and Phalathip, P. (2012). Modified starch enhanced ultrafiltration for chromium (VI) removal. **Journal of Clean Energy Technology**. 2(1): 18-22.
2. Racho, P., Wichitsathian, B. and Wonglertarak, W. (2012). Effect of Modified Starch Crosslinking on Cr (VI) Chemi-adsorption. **The 6<sup>th</sup>Pacific Basin on Adsorption Science and Technology**. 20-23 May, 2012. Taipei, Taiwan.
3. Racho, P., Wonglertarak, W. and Wichitsathian, B. (2012). **Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste**. San Servolo, Venice, Italy; 12-15 November 2012.

4. Racho, P., Jindal, R. and Wichitsatian(2012). Post treatment UASB effluents of tapioca starch wastewater using downflow hanging sponge (DHS) system. **Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt**16(1):1-9.
5. Racho, P. and Wichitsathian, B. (2011). Effect of Treatment Loading Rates on Biofilm Compositions. **Proceeding of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology**, September 8- 10, 2011, Rhodes, Dodecanese, Greece.
6. Rodyoy, S., Racho, P. and Wichitsathian, B. (2011). **Excess Sludge Reduction Using Aerobic-Anaerobic Digestion Processes. The 4<sup>th</sup> IWA-ASPIRE Conference and Exhibition**, October 2-6, 2011, Tokyo, Japan.
7. Tabu-rai, S. , Racho, P. and Wichisathian, B. (2011). Evaluation of chemical coagulation and ultrafiltration for natural organic matter removal. **International Conference of Civil Engineering and Building Materials**. Kunming, China.
8. Tabu-rai, S. , Racho, P. and Wichisathian, B. (2011). Evaluation of chemical coagulation and ultrafiltration for natural organic matter removal. **International Journal of Civil Engineering and Building Material**. 1(1).
9. Wichitsatian, B. and Racho, P. (2010). Quantification of Organic and Nitrogen Removal in Downflow Hanging Sponge (DHS) Systems as a Post-Treatment of UASB Effluent. **Water Science and Technology**. 62(9): 2121-2127.
10. Thammaporn, S., Racho, P. and Wichitsathian, B. and Jindal, R. (2010). Biokinetic Parameters as an Indicator to Biodegradability Assessment of Down-flow Hanging Sponge (DHS) System. **Thai Environmental Engineering Journal**. 24(3):1-10.
11. Wichitsatian, B. and Racho, P. (2009). Quantification of Organic and Nitrogen Removal in Downflow Hanging Sponge (DHS) Systems as a Post-Treatment of UASB Effluent. **IWA Specialist Conference Chemical Industries**. November 30-December 2. Massey University, Palmerston North, New-Zealand.
12. Racho, R., Wichisathain, B. and Jindal, R. (2009). Biokinetic Parameters as an Indicator to Biodegradability Assessment of Down-flow Hanging Sponge (DHS) System **Proceeding of the 8<sup>th</sup> National Environmental Conference**, March 25-27. Suranaree University of Technology. NakhonRatchasima, Thailand
13. Racho, R., Thamaporn, S. Wichisathain, B. and Jindal, R. (2009). Mass Balance Assessment of COD and Nitrogen Removal in a Down-flow Hanging Sponge (DHS) System. **Proceeding of the 8<sup>th</sup> National Environmental Conference**, March 25-27. Suranaree University of Technology. NakhonRatchasima, Thailand
14. Racho, P., Wichitsathian, B. and Jindal, R. (2008). Feasibility of low cost post-treatment options for the anaerobic processes of tapioca starch wastewater: Fungal Down-flow Hanging Sponge (DHS) and Bacterial DHS systems. **KKU Res. J.** 13(10): 1-

- 12.
15. Racho, P. and Wichitsathian, B. (2008). Feasibility of low cost post-treatment options for the anaerobic processes of tapioca starch wastewater: Fungal Down-flow Hanging Sponge (DHS) and Bacterial DHS systems. **12th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management (IWA DIPCON 2008)**. Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), KhonKaen University, Thailand ; 25-29 August 2008
16. Racho, P. and Jindal, R. (2004). Heavy Metals in Bottom Ash from a Medical-Waste Incinerator in Thailand. **Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt.** 8(1): 31-38.

### งานวิจัย

1. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโครเมียม(VI) ด้วยแป้งโมดิฟายด์
2. การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อบำบัดตะกอนส่วนเกินจากระบบตะกอนเร่งด้วยระบบการหมุนเวียนค่าความเป็นด่าง
3. นวัตกรรมการดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร
4. การเสริมสร้างศักยภาพและถ่ายทอดความรู้การบริหารจัดการระบบประปาชุมชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
5. การพัฒนาเซพโทลิเอสเตอร์เพื่อเป็นตัวดูดซับและตัวกลางในการกรอง
6. การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินและการผลิตก๊าซคลอรีนและไฮโดรเจนด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์
7. การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเคมีต้นทุนต่ำร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน