



## รายงานฉบับสมบูรณ์

การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเคมีต้นทุนต่ำร่วมกับ

ระบบอัลตราฟิลเตรชัน

(COMBINATION OF LOW COST CHEMICAL PROCESSES AND  
ULTRAFILTRATION FOR HARDNESS REMOVAL)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานฉบับสมบูรณ์

การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเคมีต้นทุนต่ำร่วมกับ

ระบบอัลตราฟิลเตรชัน

(COMBINATION OF LOW COST CHEMICAL PROCESSES AND  
ULTRAFILTRATION FOR HARDNESS REMOVAL)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิชรินทร์ ราช

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวกฤษมา นามสีถาน

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจใช้แบริ่ง โหมดิฟายด์ซึ่งเป็น โพลีแซคคาไรด์ที่พบในธรรมชาติและมีการผลิตอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังของประเทศไทย โดยในหลายงานวิจัยพบว่าการใช้แบริ่ง โหมดิฟายด์เป็นตัวดูดซับมีประสิทธิภาพดีในการกำจัดไอออนประจุบวกด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาด้วยแบริ่ง โหมดิฟายด์ และศึกษาสภาวะการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับแบริ่ง โหมดิฟายด์ ซึ่งการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย การศึกษาในชุดทดลองแบบกะ เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง เช่น หมู่ฟังก์ชันของแบริ่ง โหมดิฟายด์ พีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของวัสดุดูดซับ เป็นต้น โดยพบว่า แบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้เหมาะสม ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที ที่ความเข้มข้นแบริ่ง 10 กรัมต่อลิตร พบว่ามีความสามารถในการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 1.4 eq/g และมีกลไกปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นอันดับสองเทียม และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยแนวโน้มกลไกการกำจัดความกระด้าง อาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมไอออนในน้ำกระด้างกับหมู่ฟอสเฟตของแบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ จากนั้นแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนยังสามารถเข้าแทนที่ในตำแหน่งไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของแบริ่งได้ และอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนพอลิเดนเทติแกนด์ที่มีความเสถียร จากนั้นทำการศึกษาการกำจัดค่าความกระด้างด้วยแบริ่ง โหมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง พบว่า เพอเมอเทฟลักซ์ เท่ากับ 25 L/m<sup>2</sup>.hr สัดส่วนเพอเมอเทอรีเทนเทท 50:50 และการหมุนเวียนวัสดุดูดซับที่ 20% กลับมาในระบบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุด อีกทั้งยังสามารถยืดระยะเวลาในการดูดตันของเมมเบรนได้ดีที่สุด โดยการดูดตันของเมมเบรนเกิดจากอนุภาคของแป้งขนาดเล็ก เกิดการดูดตันบริเวณผิวของเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ จึงส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วในระหว่างการกรอง

## Abstract

The modified starches is an attractive sorbent in this research that contains abundant polysaccharides and are widely production in tapioca starch industry of Thailand. Several researches shown that modified starches were effectives for cationic removal by a chemisorption mechanism. The aims of this study were evaluation the hardness removal by modified tapioca starch and it's suitable operating conditions when combined with an ultrafiltration process. Two main parts of the experiment were set up and evaluated. Batch experiments were carried out to study the influencing of various factors such as functional group of modified starch, pH, contact time, and adsorbent concentration. The results showed that phosphate monoester starch achieved the highest adsorption capacity that was about 1.4 eq/g at operating condition of 5 minutes, contact time and 10 g/L, modified starch concentration. The adsorption mechanisms of hardness in water were following Freundlich isotherm and pseudo-second order. These causes of functional group of phosphate monoester starch can be exchanges with calcium or magnesium ions in hard water. Then, calcium and magnesium ions can be replacement of hydrogen in the hydroxyl group in the glucose units. After that, it can be formed a polydentate ligand that are stability compounds. The next experiment, a continuous ultrafiltration process that combined with modified starch adsorbent were evaluated. The highest removal efficiency of hardness were found at an operating condition of permeate flux 25 L/m<sup>2</sup>.hr, permeate to retentate ratio 50:50 and 20% of absorbent reclamation. Moreover, this can be lower clogging than the other conditions. The surface membrane clogging may cause of a small particulate of phosphate monoester starch that causes of a large flux are losing.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พชรินทร์ ราช



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	๓
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 ลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำอ่อน.....	5
2.1.1 น้ำบาดาล.....	5
2.1.2 น้ำประปา.....	7
2.2 ผลกระทบของน้ำกระด้าง.....	8
2.2.1 ปัญหาน้ำกระด้างส่งผลต่อชีวิตประจำวัน.....	8
2.2.2 ปัญหาน้ำกระด้างส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไอน้ำและระบบทำ ความร้อน.....	9
2.2.3 ปัญหาผลกระทบของน้ำกระด้างในโรงงานอุตสาหกรรม อาหาร.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3	การใช้น้ำอ่อนในอุตสาหกรรม.....10
2.3.1	น้ำอ่อนและความต้องการน้ำอ่อน.....10
2.3.2	การใช้ประโยชน์น้ำอ่อนในอุตสาหกรรม.....10
2.3.3	คุณภาพของน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม.....10
2.4	เทคโนโลยีการกำจัดความกระด้าง.....12
2.4.1	การตกตะกอน (Chemical precipitation).....12
2.4.2	การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange).....14
2.4.3	กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane filtration).....15
2.4.3.1	ไมโครฟิลเตรชัน (MF).....15
2.4.3.2	อัลตราฟิลเตรชัน (UF).....17
2.4.3.3	นาโนฟิลเตรชัน (NF).....17
2.4.3.4	ออสโมซิสผันกลับ (RO).....17
2.4.4	การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Treatment).....18
2.4.5	การดูดซับ (Adsorption).....19
2.5	กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....19
2.5.1	กลไกการดูดซับ.....19
2.5.2	ประเภทของการดูดซับ.....20
2.5.3	จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....23
2.5.4	ไอโซเทอมของการดูดซับ.....24
2.5.5	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....26
2.6	วัสดุดูดซับ.....28
2.7	แป้งโมดิฟายด์.....29
2.7.1	แป้งโมดิฟายด์ (modified starch).....29
2.7.1.1	แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก.....29
2.7.1.2	แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ.....29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.2 ชนิดของแป้ง โมดิฟายด์.....	30
2.7.3 เกณฑ์ในการเลือกแป้ง.....	33
2.7.4 แป้ง โมดิฟายด์ทางเคมี.....	33
2.8 แนวโน้มในการแยกแป้งออกจากรองน้ำ.....	38
2.8.1 การกรอง (Filtration).....	38
2.8.2 การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation).....	41
2.8.3 อัลตราฟิลเตรชัน Ultrafiltration (UF).....	42
2.8.3.1 ปัญหาที่ส่งผลต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน.....	42
2.8.3.2 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชันในอุตสาหกรรม.....	44
2.8.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างให้สูงขึ้น ในกระบวนการเมมเบรน.....	45
2.8.3.4 การใช้แป้งกำจัดโลหะร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน.....	46
2.8.3.5 สถานะในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน.....	47
2.8.3.6 การทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรน.....	49
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 น้ำตัวอย่าง.....	54
3.2 ตัวดูดซับ.....	56
3.3 ชุดทดลองแบบกะ.....	57
3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแป้ง โมดิฟายด์.....	57
3.4.1 การศึกษาผลกระทบหมู่ฟังก์ชันของแป้ง โมดิฟายด์.....	57
3.4.2 การแปรเปลี่ยนพีเอช.....	58
3.4.3 การแปรผันระยะเวลาสัมผัส.....	59
3.4.4 การแปรผันปริมาณของแป้ง.....	59
3.4.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์.....	60
3.4.6 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ.....	61



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การศึกษาการกำจัดความกระด้างร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน	62
3.5.1 ชุดการทดลอง	62
3.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับแป้ง โมดิฟายด์	64
3.6.1 ผลของการแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์	64
3.6.2 ผลของการแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท	65
3.6.3 ผลกระทบการหมุนเวียนตัวดูดซับกลับมาใช้ในระบบ	65
3.6.4 ผลของสารก่อกวนต่อการดูดตันของเมมเบรน	65
3.6.5 การล้างทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรน	66
3.7 ผลกระทบการกำจัดความกระด้างร่วมกับปูนขาว-โซดาแอช	66
3.7.1 การหาปริมาณปูนขาว-โซดาแอชที่เหมาะสม	67
3.7.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของแป้งโมดิฟายด์ในกระบวนการปูนขาว- โซดาแอช	67
3.8 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	68
<b>4 ผลการศึกษา</b>	<b>69</b>
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำดิบ	69
4.2 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันของแป้งโมดิฟายด์ในการกำจัดความกระด้าง	70
4.3 ผลกระทบของค่าพีเอช	74
4.4 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส	76
4.5 ผลกระทบของปริมาณแป้งโมดิฟายด์	79
4.6 จลนพลศาสตร์	81
4.7 สมดุลการดูดซับ	84
4.8 คุณภาพน้ำประปา ก่อนเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน	88
4.9 ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์	88
4.10 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท	92

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.11 ผลกระทบการหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับมาใช้งาน.....	95
4.12 ผลกระทบของสารก่อตะกอนต่อการดูดตันของเมมเบรน.....	98
4.13 การหาปริมาณปูนขาว- โซดาแอชที่เหมาะสม.....	100
4.14 ผลกระทบของความเข้มข้นของแป้ง โมดิไฟยัดในกระบวนการปูนขาว- โซดาแอช.....	102
<b>5 สรุปผลการศึกษา.....</b>	<b>105</b>
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดลองแบบกะ.....	120
ภาคผนวก ข รูปแบบระบบอัลตราฟิลเตรชัน.....	128
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณ.....	130
ภาคผนวก ง จลนศาสตร์และสมดุลการดูดซับ.....	133
ภาคผนวก จ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับแป้ง โมดิไฟยัด.....	136
ภาคผนวก ฉ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	151
ประวัติผู้เขียน.....	156

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำบาดาล..... 6
2.2	แสดงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำประปา..... 8
2.3	ปริมาณน้ำอ่อนที่ใช้เพื่ออุตสาหกรรมต่างๆ..... 11
2.4	ค่าความกระด้างที่เหมาะสม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท..... 12
2.5	การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการตกตะกอน..... 13
2.6	การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน..... 16
2.7	การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 18
2.8	การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ..... 18
2.9	การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการแยกด้วยไฟฟ้าเคมี..... 21
2.10	การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการดูดซับ..... 22
2.11	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับ..... 31
2.12	วัสดุดูดซับทางธรรมชาติ..... 32
2.13	เกณฑ์ในการเลือกแป้ง..... 34
2.14	การกำจัดโลหะด้วยแป้งโมดิฟายด์..... 39
2.15	กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน..... 43
2.16	กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน..... 45
2.17	การใช้แป้งในการกำจัดไอออนโลหะหนักร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน..... 48
2.18	การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน..... 50
2.19	สภาวะในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน..... 52
2.20	สารเคมีที่ใช้ที่การทำความสะอาดสารที่อุดตันเมมเบรน..... 53
3.1	คุณสมบัติของแป้งโมดิฟายด์..... 56
3.2	การศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันของแป้งโมดิฟายด์..... 57
3.3	การศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับความกระด้าง..... 59
3.4	การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับความกระด้าง..... 59

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.5 การศึกษาปริมาณของแบ็ง โมดิฟายด์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความ กระด้าง.....	62
3.6 รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง.....	64
3.7 การแปรผันเพอมีอเทฟลักซ์.....	65
3.8 การแปรผันสัดส่วนเพอมีอเทตอร์เทนเท.....	65
3.9 การศึกษาความเข้มข้นของปูนขาวที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความ กระด้าง.....	67
3.10 การศึกษาปริมาณของแบ็งที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง.....	67
3.11 พารามิเตอร์และวิธีในการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ.....	68
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำประปา.....	70
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแบ็ง โมดิฟายด์.....	71
4.3 คุณสมบัติของแบ็ง โมดิฟายด์.....	73
4.4 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแบ็ง โมดิฟายด์.....	74
4.5 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดความกระด้างด้วยแบ็ง โมดิฟายด์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 5-300 นาที.....	76
4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ.....	78
4.7 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแบ็ง โมดิฟายด์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที.....	79
4.8 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแบ็งฟอสเฟต โม โนเอสเตอร์.....	81
4.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างของแบ็งฟอสเฟต โม โนเอสเตอร์ อันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม.....	83
4.10 สมดุลการดูดซับความกระด้างของแบ็งฟอสเฟต โม โนเอสเตอร์ Langmuir model และ Freundlich model.....	87
4.11 คุณภาพน้ำประปาก่อนเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชัน.....	88
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแบ็ง โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน ที่เพอมีอเทฟลักซ์ 20-30 L/m <sup>2</sup> .hr.....	91

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์ ที่เพอมีเอทฟลักซ์ 20-30 L/m <sup>2</sup> .hr.....	91
4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแป้งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน ที่การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 50:50 และ 75:25.....	93
4.15 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์ ที่การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 50:50 และ 75:25.....	95
4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน ที่การหมุนเวียนตัวดูดซับ 20, 30 และ 50%.....	98
4.17 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์ ที่การหมุนเวียนตัวดูดซับ 20, 30 และ 50%.....	98
4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแป้งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อเติมสารก่อตะกอน.....	99
4.19 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์ เมื่อเติมสารก่อตะกอน.....	100
4.20 คุณภาพน้ำหลังกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว-โซดาแอช และแป้งโมดิฟายด์.....	102
4.21 คุณภาพน้ำหลังตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอช.....	103
4.22 คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์.....	104

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุบวก..... 29
2.2	โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ..... 30
2.3	โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง..... 33
2.4	แป้งแอมโฟเทอริก..... 35
2.5	แป้งอะซิทิเลทออกซิไดซ์..... 35
2.6	แป้งออกซิไดซ์..... 36
2.7	โครงสร้างทางเคมีของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์..... 37
2.8	Concentration polarization..... 44
2.9	Cake layer..... 45
3.1	แผนการดำเนินงาน..... 55
3.2	แผนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้าง..... 58
3.3	ชุดการทดลองแบบกะ..... 58
3.4	การติดตั้งชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการ..... 63
3.5	ชุดทดลองแบบกะในการหาปริมาณปูนขาว โซดาแอสที่เหมาะสม..... 66
4.1	ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับความกระด้างทั้งหมดของแป้งโมดิฟายด์..... 71
4.2	กลไกการจับไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์..... 73
4.3	กลไกการจับไอออนโลหะประจุสองบวกของแป้งคาร์บอกซิเมทิล..... 73
4.4	ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของแป้งโมดิฟายด์ที่พีเอช 5.5 และพีเอชน้ำธรรมชาติ..... 75
4.5	ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของแป้งโมดิฟายด์ที่พีเอช 5.5 และพีเอชน้ำธรรมชาติ 7.5..... 75
4.6	ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ และแป้งมันสำปะหลังไม่ได้ดัดแปร..... 77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสามารถในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ และเบี่ยงมันสำปะหลังไม่ได้ตัดแปร	78
4.8 ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับความกระด้างในน้ำของ เบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์	80
4.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ อันดับหนึ่งเทียบ	83
4.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ อันดับสองเทียบ	83
4.11 สมดุลการดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ (Langmuir model)	86
4.12 สมดุลการดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ (Freundlich model)	86
4.13 ผลของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ 20 25 และ 30 L/m <sup>2</sup> .hr	90
4.14 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 50:50 และ 75:25	94
4.15 ผลของการหมุนเวียนตัวดูดซับ 20 30 และ 50%	96
4.16 การลดลงของเพอมีเอท เมื่อมีการเติมสารก่อตะกอนและหมุนเวียนตัวดูดซับ 20%	99
4.17 ความกระด้างทั้งหมดหลังการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอสร่วมกับการใช้ เบี่ยงโมดิฟายด์	101
4.18 ค่าพีเอชของน้ำหลังการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอสร่วมกับการใช้เบี่ยงโมดิฟายด์	101
4.19 ความสามารถในการดูดซับของเบี่ยงโมดิฟายด์ ความเข้มข้น 10-50 g/L	103

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำอ่อนในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรมค่อนข้างสูง เช่น ใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งต้องใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำกระด้างทำให้เกิดตะกอนภายในท่อไอน้ำ รุกระบายไอน้ำ ทำให้รั่วหรือท่ออุดตัน น้ำหรือไอน้ำไหลผ่านไม่สะดวก ส่งผลต่อความปลอดภัยของอาหารและสิ้นเปลืองพลังงาน การสะสมของตะกอนหากเกิดบนพื้นผิวเครื่องจักรที่ใช้เพื่อการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน (thermal processing) โดยเฉพาะระบบการฆ่าเชื้อแบบต่อเนื่อง (in-line pasteurization) ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น plate heat exchanger คราบตะกอนที่พอกหนาขึ้น จะเป็นเหมือนฉนวน ทำให้ลดประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องใช้จ่ายเงินจำนวนหนึ่งเพื่อบำบัดค่าความกระด้างนี้ให้เหมาะสม โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดน้ำกระด้างหรือกระบวนการผลิตน้ำอ่อน แบ่งออกได้เป็นการตกตะกอนทางเคมี, กระบวนการเมมเบรน, อิเล็กโทรไลซิส, การดูดซับ และการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการบำบัดความกระด้างในภาคอุตสาหกรรมนั้นมี 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการตกตะกอน และการแลกเปลี่ยนไอออน (Saeed, A.M., and Hamzah, M.J., 2013) กระบวนการตกตะกอนทางเคมี มีการเติมสารเคมีบางชนิดเพื่อให้เกิดการตกผลึกขึ้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้กำจัดความกระด้าง ได้แก่ ปูนขาว (CaO) และ โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ทำให้เกลือของแคลเซียม และแมกนีเซียมซึ่งไม่ละลายน้ำตกตะกอน แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถกำจัดค่าความกระด้างให้หมดไปได้ โดยทั่วไปน้ำที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการปูนขาวและโซดาแอชจะมีค่าความกระด้างหลงเหลืออยู่ประมาณ 30-35 mg/L as  $\text{CaCO}_3$  (Qasim et al., 2000) อีกทั้งกระบวนการตกตะกอน จำเป็นต้องใช้พื้นที่ติดตั้งมาก มีการดูแลระบบค่อนข้างยุ่งยาก และต้องปรับเปลี่ยนค่าพีเอชให้เหมาะในการตกตะกอนและการใช้งาน (Randtk และ Hoeha, 1999) ส่วนกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) นิยมใช้เรซินในการแลกเปลี่ยนไอออน ได้รับความนิยมมากในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์ เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อย ดูแลรักษาระบบง่าย ควบคุมง่าย และสามารถกำจัดค่าความกระด้างให้หมดไปจากน้ำหรือให้มีความเข้มข้นเหลือต่ำๆ ได้ ซึ่งเรซินเมื่อหมดสภาพในการกำจัดไอออน ต้องทำการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้เกลือ



(NaCl) 8-15% และในการฟื้นฟูสภาพเรซินจะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงถึง 40,000-150,000 ppm. (U.S Department of the Interior, 2002) ซึ่งมีค่าความเค็มสูง หากปล่อยลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะเกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียเฉพาะน้ำเกลือ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเกลือค่อนข้างสูง เช่น ระบบบำบัดความเค็มโดยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Li et al., 2013) และต้องใช้พื้นที่มาก เช่น ระบบการบำบัดความเค็มโดยการระเหย (Martinez and Pozuelo, 2011)

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คอลลอยด์ แป้ง โปรตีน ออกจากน้ำ ซึ่งกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันใช้แรงดันในการเดินระบบที่ต่ำกว่าระบบนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสแบบผันกลับ อีกทั้งใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน จึงได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน แต่เนื่องจากระบบอัลตราฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัดไอออนประจุสองบวกที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของน้ำกระด้างได้ ดังนั้น จำเป็นต้องใช้ระบบอื่นร่วมด้วย ซึ่งในปัจจุบัน มีการใช้วัสดุทางการเกษตรและวัสดุจากธรรมชาติมากมายในการกำจัดไอออนโลหะประจุสองบวกในน้ำ โดยการดัดแปรด้วยวิธีการทางเคมี ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนมากขึ้น (O' Connell et al., 2008) ถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาวัสดุจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุดูดซับราคาแพง โดยปัจจุบันนิยมนำแป้งมันสำปะหลังมาดัดแปร เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำค่อนข้างสูง เนื่องจากแป้งหาได้ง่าย ราคาถูก สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง การศึกษาของ Xu et al. (2005) ใช้แป้งแอมโฟเทอริกในการดูดซับ Pb(II) ในน้ำเสีย พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงถึง 152.74 mg/g และ Wang et al. (2011) ทำการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเพื่อกำจัดโลหะหนักพร้อมกับแป้งคาร์บอกซิเมททิล พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb(II) และ Cu(II) เท่ากับ 99% และ 90% ตามลำดับ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจศึกษาทางเลือกในการกำจัดความกระด้างของน้ำในรูปแบบใหม่ เพื่อลดปัญหาการเกิดน้ำเสียที่มีค่าความเค็มสูงจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูง โดยศึกษาการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์ การศึกษาประกอบด้วย (1) การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างด้วยชุดทดลองแบบกะ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับค่าความกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ และกลไกการเกิดปฏิกิริยาและความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดความกระด้าง (2) การศึกษาการเดินระบบกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยการเดินระบบต่อเนื่อง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองเมมเบรนในการกำจัดความกระด้าง ร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์ และศึกษาปัจจัยที่มี

ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินระบบของระบบอัลตราฟิลเตรชัน และ (3) การศึกษาผลกระทบของการกำจัดความกระด้างด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ร่วมกับปูนขาว-โซดาแอส ซึ่งการศึกษานี้ เลือกลงใช้เบี่ยงโมดิฟายด์ในการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นการใช้วัสดุจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์ ลดต้นทุนในการซื้อวัสดุชุดบำบัดราคาแพง เพื่อให้ได้น้ำอ่อนที่มีค่าความกระด้างต่ำเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภคหรือใช้ในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชยกรรมได้จริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบการกำจัดค่าความกระด้างด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 เบี่ยงโมดิฟายด์ ชนิดประจุลบ ที่ดัดแปรด้วยกระบวนการทางเคมี มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถลดค่าความกระด้างในน้ำประปาได้

1.3.2 เยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพสูงในการแยกเบี่ยงโมดิฟายด์ออกจากน้ำได้

1.3.3 การใช้ปูนขาว-โซดาแอส ในการกำจัดความกระด้างร่วมกับเบี่ยงโมดิฟายด์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีขึ้น หรือสามารถลดค่าความกระด้างให้ต่ำลงได้

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ โดยทำการทดลองในชุดทดลองแบบกะ (Batch Experiments) พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในการศึกษานี้ ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันของเบี่ยงโมดิฟายด์ ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณความเข้มข้นของเบี่ยงโมดิฟายด์

1.4.2 พารามิเตอร์ในการประเมินในการกำจัดค่าความกระด้างในน้ำประปาด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ ประกอบด้วย พีเอช ความกระด้างทั้งหมด (total hardness) ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำ (TDS) และค่าซีโอดี (COD) เป็นต้น

1.4.3 นำข้อมูลในส่วนการทดลองจากการทดลองแบบกะที่เหมาะสม ทำการศึกษาการเดินระบบการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชันแบบการไหลต่อเนื่อง โดยทำการเดินระบบจนกระทั่งค่าเพอมีอเทฟลักซ์ลดลง 60% จึงทำความสะอาดเมมเบรน และเดิน

ระบบจนครบ 4 ชั่วโมงต่อชุดการทดลอง จึงเริ่มทำการเดินระบบชุดทดลองใหม่ โดยพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการเดินระบบ ได้แก่ การแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์ การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท ผลของการหมุนเวียนตัวดูดซับกลับมาใช้ และผลของสารก่อกวนต่อการดูดซับของเมมเบรน

1.4.4 วิเคราะห์พารามิเตอร์ในการศึกษาการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ ค่าความกระด้าง (total hardness) ค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำ (TDS) ค่าซีโอดี (COD) ค่าพีเอช และประเมินประสิทธิภาพในการดูดซับของเยื่อกรองเมมเบรน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเสนอแนวทางในการจัดการระบบผลิตน้ำอ่อนที่เหมาะสมในการใช้งานจริง ในชุมชน อุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรม โดยใช้วัสดุคัดแปรจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.5.2 โรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนที่มีค่าน้ำกระด้างสูง สามารถนำผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ไปปรับใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นแนวทางลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำกระด้าง

1.5.3 นำเสนอผลงานประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ เพื่อเผยแพร่กับนักวิชาการและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปพัฒนาในวัสดุจากธรรมชาติชนิดอื่นและใช้ประโยชน์ต่อไปได้ในอนาคต

1.5.4 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง โลหะประจุบวกสองหรือโลหะหนักในน้ำด้วยแป้งโมดิฟายด์หรือวัสดุดูดซับทางธรรมชาติคัดแปรชนิดอื่นๆ

## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำอ่อน

ปัจจุบันมีการใช้น้ำอ่อนอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมอาหาร กระป๋อง อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง โรงงานที่มีการใช้หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ และระบบหล่อเย็นในระบบปรับอากาศแบบใช้ chiller ในห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมขนาดใหญ่ เป็นต้น (Bruggen et al., 2009) เป็นต้น ซึ่งในการนำน้ำดิบมาเพื่อใช้ในการผลิตน้ำอ่อนถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยแหล่งน้ำในการสูบน้ำดิบในปัจจุบัน ได้แก่ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน หลังจากการสูบน้ำดิบเพื่อใช้ในการผลิตน้ำประปาแล้ว น้ำประปาจะถูกใช้ในการกระบวนการผลิตน้ำอ่อน เพื่อให้ได้น้ำอ่อนที่มีคุณสมบัติตามการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ซึ่งในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินประกอบด้วยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ รวมไปถึงไอออนต่างๆที่สามารถละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ซึ่งส่งผลให้คุณลักษณะของน้ำประปาที่ผลิตได้แตกต่างกันไปตามแหล่งน้ำดิบที่ใช้ และสภาพภูมิประเทศ ที่ตั้งของระบบประปาในแต่ละแหล่ง ดังนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของแหล่งน้ำดิบและคุณสมบัติของน้ำประปาในการผลิตน้ำอ่อน

##### 2.1.1 น้ำบาดาล

น้ำในธรรมชาติจะหมุนเวียนและเปลี่ยนแปลงตามสิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ซึ่งน้ำในวัฏจักรจะมีประมาณ 1360 ล้าน ลบ.กม. ซึ่งรวมในมหาสมุทร ทะเลสาบ แม่น้ำ และน้ำในบรรยากาศ ซึ่งปริมาณ 97% ของน้ำทั้งหมดจะเป็นส่วนของน้ำในมหาสมุทร ส่วนที่เหลือ 37 ล้าน ลบ.กม. เป็นน้ำจืดซึ่งจะเป็นน้ำแข็งในบริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ ประมาณ 8 ล้าน ลบ.กม. เป็นน้ำที่กักเก็บในช่องว่างของหินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำหรือที่เรียกกันว่า “น้ำบาดาล” หรือรวมไปถึงน้ำใต้ดินด้วย และอีก 0.24 ลบ.กม. จะเป็นน้ำในแม่น้ำลำธารต่างๆ (สัญญา สราภิรมย์ และ อัครพร อัครราช, 2548)

น้ำบาดาล เป็นแหล่งน้ำใต้ดิน แต่ไม่ได้มีอยู่ทั่วทุกแห่ง ซึ่งจะมีปริมาณและคุณภาพแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่และตามความลึก โดยที่ทั้งคุณภาพตั้งแต่ดี ปานกลาง สามารถใช้ในการอุปโภคและ

บริโภค จนมีความกระด้างและเหล็กสูง และน้ำเค็ม และในบางพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง มีสิ่งปนเปื้อนจากผิวดิน ดังนั้นการศึกษาคุณภาพของน้ำบาดาล จำเป็นต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพตลอดจนลักษณะทางเคมีด้วย (กองวิเคราะห์น้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล) จากตัวอย่างการศึกษาคุณลักษณะของน้ำบาดาล ดังตารางที่ 2.1 พบว่า พื้นที่ในเขตนครชัยบุรินทร์ ซึ่งประกอบด้วยจังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ สุรินทร์และบุรีรัมย์ น้ำใต้ดินมีความใส แต่มีแร่ธาตุละลายอยู่ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงออกในรูปของค่าของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) และค่าความกระด้างเช่นเดียวกับการศึกษาแอ่งน้ำบาดาล จังหวัดเลย ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทั่วไปของน้ำบาดาล ซึ่งจากคุณภาพน้ำตัวอย่างนี้ ไม่สามารถนำมาอุปโภคบริโภคได้เลยทันที เนื่องจากมีค่าความกระด้างที่สูงเกินมาตรฐานน้ำดิบ (เกรียงศักดิ์ อุมดมสินโรจน์, 2541; จิรียา ยี่มรัตน์บวร, 2555 ; กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2558) อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ เช่น โรคหัวใจ โรคผิวหนัง ส่งผลต่อระบบสืบพันธุ์ และโรคมะเร็งในตับ (Chiu et al., 2010) ดังนั้นจำเป็นต้องมีการบำบัดให้เป็นน้ำอ่อน และมีการฆ่าเชื้อก่อนนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค อีกทั้ง ก่อนนำน้ำไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา จำเป็นต้องมีการกำจัดของแข็งแขวนลอยและไอออนต่างๆ เพื่อลดภาระของระบบผลิตน้ำอ่อน และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตน้ำอ่อนในส่วนของอายุการใช้งานของอุปกรณ์อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำบาดาล

แหล่งที่มา		เกรียงศักดิ์ อุมดมสินโรจน์ (2541)	จิรียา ยี่มรัตน์บวร (2555)	กรม ทรัพยากรน้ำ บาดาล (2558)	Anwar, K.M., and Aggarwal, V. (2014)
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าโดยทั่วไป	นครชัย บุรินทร์	แอ่งน้ำบาดาล จังหวัดเลย	Aligarh city, India
ความขุ่น	NTU	0.5	0.66	-	0.05 - 2.37
pH	-	7.5	6.49	-	7.01 - 8.82
TDS	mg/L	250	461	240 – 767	224 – 987
Total Hardness	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	120	276	140 – 480	197 – 608
Chloride	mg/L	25	44.42	1.5 – 130	22 – 421
Sulfate	mg/L	10	12.26	14 – 35	13.2 - 379.2

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำบาดาล (ต่อ)

แหล่งที่มา		เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2541)	จริยา ยัมรัตนบวร (2555)	กรมทรัพยากร น้ำบาดาล (2558)	Anwar, K.M., and Aggarwal, V. (2014)
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าโดยทั่วไป	นครชัย บุรีรินทร์	แอ่งน้ำบาดาล จังหวัดเลย	Aligarh city, India
Nitrate	mg/L	10	2.88	0.9 – 19	0.19 - 25.23
Fluoride	mg/L	0.1	-	0.4 - 0.9	0.01 - 0.71
Iron	mg/L	0.1	0.10	0.1 – 29	0.06 - 0.61

### 2.1.2 น้ำประปา

แหล่งน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่อาศัยน้ำจากน้ำผิวดิน โดยส่วนใหญ่ น้ำผิวดินไม่สามารถนำมาดื่มได้อย่างปลอดภัย โดยปราศจากการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากการไหลของน้ำบนผิวดินได้ชะล้างพัดพาเอาสิ่งต่าง ๆ ปะปนมาทั้งตะกอนและจุลชีพ ทำให้น้ำผิวดินมีคุณภาพไม่ดี เช่น มีความขุ่น สี สารพิษ และเชื้อโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะน้ำที่ไหลผ่านย่านชุมชนหรือย่านอุตสาหกรรม คุณภาพของน้ำ ผิวดินขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่น้ำ ผิวดินไหลผ่าน (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2536) โดยน้ำประปาที่ผ่านระบบการปรับปรุงคุณภาพและฆ่าเชื้อโรคมาแล้ว จะมีความสะอาดที่สามารถใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้ จะต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานของน้ำประปา ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่นเดียวกับน้ำบาดาล จากตารางที่ 2.2 แสดงถึงคุณภาพของน้ำประปาที่ส่งจ่ายไปยังครัวเรือน พบว่า น้ำประปาในจังหวัดพัทลุง รวมถึงน้ำประปาในเขตนครชัยบุรีรินทร์ มีค่าโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟิคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรียสูงกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานน้ำประปาของกรมอนามัยได้กำหนดไว้ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพได้หากมีการดื่มเข้าไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาระบบประปาในพื้นที่ดังกล่าว พบว่าระบบประปาของนครชัยบุรีรินทร์บางแห่งไม่มีการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค (จริยา ยัมรัตนบวร, 2555) ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องบำบัดน้ำประปา โดยการฆ่าเชื้อโรค และนำเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค และในงานวิจัยของ ยุภาพร อำนวย และคณะ (2557) ทำการศึกษาระบบน้ำประปาในจังหวัดอุบลราชธานี จำนวน 110 หมู่บ้าน ครอบคลุม 25 อำเภอ พบว่า ค่าพารามิเตอร์ของน้ำประปายังมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานน้ำประปากำหนดไว้ โดยน้ำประปาสูบน้ำจากน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินเพื่อนำมาผลิตน้ำประปา ซึ่งแหล่งน้ำจะมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง และแสดงออกในรูปของค่าของแข็งละลายทั้งหมด รวมถึงค่าความกระด้างที่มีค่าสูง แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบประปาที่ไม่ได้

มาตรฐาน รวมทั้งการวางเส้นท่อของระบบประปาที่ส่งจ่ายไปยังชุมชน อาจมีอายุการใช้งานที่นานจนเกิดสนิม ทำให้มีค่าเหล็กที่สูง ไม่เหมาะที่จะนำมาดื่ม ดังนั้น เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อสุขภาพ จำเป็นจะต้องนำน้ำเข้าสู่ระบบผลิตน้ำอ่อน ก่อนที่จะนำไปดื่มกิน ทั้งนี้คุณภาพของน้ำประปา ก็ขึ้นอยู่กับ การเลือกที่ตั้ง การวางรูปแบบระบบและระบบชลศาสตร์ (Plant siting, layouts and hydraulics) พลังงานและทรัพยากรที่ใช้ในการเดินระบบ (Energy and resources requirements) และการควบคุมระบบผลิตน้ำประปา ด้วยเครื่องมือและบุคลากรร่วมด้วย (Qasim, 2000)

## 2.2 ผลกระทบของน้ำกระด้าง

### 2.2.1 ปัญหาน้ำกระด้างส่งผลต่อชีวิตประจำวัน

น้ำกระด้างก่อให้เกิดการลดลงของฟองสบู่และผงซักฟอก ดังนั้นในการทำความสะดวกร่างกายจำเป็นต้องใช้สบู่เพิ่มมากขึ้น หรือใช้ผงซักฟอกมากขึ้นเพื่อทำความสะอาดเสื้อผ้า (Heidekamp and Lemley, 2005; Cameron, 2011) และยังก่อให้เกิดคราบตามสุขภัณฑ์ ข้อต่อ อ่างล้างหน้า เครื่องใช้ เครื่องซักผ้า และพื้นผิวอื่นๆที่สัมผัสกับน้ำกระด้าง อีกทั้งยังก่อให้เกิดคราบเหลืองตามเสื้อผ้าอีกด้วย (Mustapha et al., 2016) และหากมีการอุปโภค บริโภคน้ำกระด้างสามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ เช่น โรคผิวหนัง โรคผิวหนัง ส่งผลต่อระบบสืบพันธุ์ และโรคมะเร็งในตับ (Chiu et al., 2010)

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำประปา

แหล่งที่มา		กรมอนามัย (2553)	ชนาวัฒน์ รัก กมล และ คณะ (2551)	จิริยา ยิ้มรัต นบวร (2555)		ยูภาพร อำนาจ และคณะ (2557)
พารามิเตอร์	หน่วย	มาตรฐาน น้ำประปา	พื้ตูลุง	นครชัยบุรินทร์		อุบลราชธานี
				ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	
ความขุ่น	NTU	10	4.77	6.44	7.58	0.24-16.83
pH	-	6.5-8.5	7.41	7.31	6.22	4.4 - 8.63
TDS	mg/L	<1,000	88	374.92	342.92	17.4 - 4,450
Total Hardness	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	<500	75.65	-	-	6 - 400
Nitrate	mg/L	<50	-	1.47	2.7	0 - 247.5
Chloride	mg/L	<250	9	-	-	5 - 130

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำประปา (ต่อ)

แหล่งที่มา		กรมอนามัย (2553)	ธนาวัฒน์ รัศ กมล และ คณะ (2551)	จรียา ยิ้มรัต นบวร (2555)	ยูภาพร อำนาจ และคณะ (2557)	
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่ามาตรฐาน น้ำประปา	พื้ทลุง	นกรชัยบุรินทร์		อูบลาธาธานี
				ถคูฝน	ถคูแถ้ง	
Fluoride	mg/L	<0.7	ไม่พบ	0.55	0.79	-
Iron	mg/L	<0.5	0.014	0.32	0.35	0.01 - 2.1
Manganese	mg/L	<0.3	0.002	0.11	0.16	-
Total Chloroform	โคโลนี/ 100 มล	0	17	68.65	179.62	ไม่พบ
Fecal Chloroform	โคโลนี/ 100 มล	0	<1.8	24.15	138.85	ไม่พบ

### 2.2.2 ปัญหาน้ำกระด้างส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไอน้ำและระบบทำความร้อน

น้ำกระด้างเป็นสาเหตุของปัญหาการอุดตัน เนื่องจากตะกอนเกิดขึ้นในระบบท่อส่ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องอายุการใช้งานของอุปกรณ์และเครื่องจักรลดลง จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องจักรเหล่านั้นมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลง นอกจากนี้คราบตะกอนที่เกิดขึ้น ยังสามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในระบบอีกด้วย ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้มากขึ้น (Reddiroot'r, 2016)

### 2.2.3 ปัญหาผลกระทบของน้ำกระด้างในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมอาหารมีการนำเอาน้ำมาใช้ค่อนข้างสูง เช่น โรงงานอาหารกระป๋อง กระบวนการผลิตขนม ลูกกวาด กระบวนการผลิตน้ำดื่ม เป็นต้น หากน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีค่าความกระด้างสูง ก็จะส่งผลกระทบต่อระบบในหลายด้าน เช่น ผลต่อรสชาติของน้ำ เกลือแร่ที่มีอยู่ในน้ำ มีผลต่อรสชาติของน้ำดื่ม และอาหารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ อีกทั้งน้ำกระด้างทำให้เกิดคราบตกค้างอยู่บนพื้นผิวของเครื่องใช้ ภาชนะต่างๆ และเครื่องจักรที่ใช้แปรรูปอาหาร (food processing equipment) ที่มีพื้นผิวสัมผัสอาหาร (food contact surface) จะเกิดการสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ได้ง่ายโดยเฉพาะจุลินทรีย์ ในกระบวนการที่มีการใช้หม้อต้มไอน้ำ น้ำกระด้างทำให้เกิดตะกอนภายในท่อไอน้ำ ระบายไอน้ำ ทำให้อุณหภูมิหรือท่ออุดตัน น้ำหรือไอน้ำไหลผ่านไม่สะดวก (Reddiroot'r,



2016) ส่งผลต่อความปลอดภัยของอาหารและสิ้นเปลืองพลังงาน การสะสมของตะกอนหากเกิดบนพื้นผิวเครื่องจักรที่ใช้เพื่อการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน (thermal processing) โดยเฉพาะระบบการฆ่าเชื้อแบบต่อเนื่อง (in-line pasteurization) ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น plate heat exchange คราบตะกอนที่พอกหนาขึ้น จะเป็นเหมือนฉนวน ทำให้ลดประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้การฆ่าเชื้ออาหารไม่สมบูรณ์ และอาจทำให้มีจุลินทรีย์หลงเหลืออยู่จนเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค เนื่องจากการฆ่าเชื้อไม่สมบูรณ์

## 2.3 การใช้น้ำอ่อนในอุตสาหกรรม

### 2.3.1 น้ำอ่อนและความต้องการน้ำอ่อน

การผลิตน้ำอ่อน (Water Softener) หรือน้ำปราศจากความกระด้าง คือ น้ำที่ไม่มีหรือมีความเข้มข้นต่ำของมลทินที่เป็น ไอออนของธาตุแคลเซียมและไอออนของธาตุแมกนีเซียม มีวัตถุประสงค์เพื่อการเตรียมน้ำใช้ในอุตสาหกรรม และการอุปโภคบริโภค โดยในอุตสาหกรรมบางประเภท ยอมให้มีค่าความกระด้างได้บ้าง เช่น น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสามารถมีค่าความกระด้างได้ไม่เกิน 20 mg/l as CaCO<sub>3</sub> แต่กระบวนการผลิตบางประเภทจำเป็นต้องควบคุมค่าความกระด้างให้มีค่าต่ำมาก ๆ หรือไม่มีค่าความกระด้างอยู่เลย เช่น น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ ต้องมีค่าความกระด้างต่ำกว่า 10 mg/l as CaCO<sub>3</sub> เนื่องจากจะส่งผลต่อระบบความร้อน เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำลดลง ซึ่งในอุตสาหกรรมฟอกย้อมน้ำที่มีค่าความกระด้างสูงจะส่งผลให้ผ้าที่ย้อมมีสีติดไม่สม่ำเสมอหรือสีผ้าผิดเพี้ยนไป (สำนักเทคโนโลยีน้ำและอุตสาหกรรมโรงงาน)

### 2.3.2 การใช้ประโยชน์น้ำอ่อนในอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันมีการนำน้ำอ่อนมาใช้ประโยชน์ค่อนข้างสูงในภาคอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งต้องใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำตาล อาหารกระป๋อง แป้งมันสำปะหลัง อาหารกึ่งสำเร็จรูป อาหารแช่แข็ง เป็นต้น อีกทั้งยังมีการใช้น้ำอ่อนในหม้อต้มน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงาน ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ และระบบหล่อเย็นในระบบปรับอากาศแบบใช้ chiller ในห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมขนาดใหญ่ เป็นต้น (Bruggen et al., 2009)

### 2.3.3 คุณภาพของน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม

น้ำอ่อนที่ใช้เพื่อการอุตสาหกรรมมีมาตรฐานทางคุณภาพที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของโรงงานแต่ละประเภท ซึ่งในแต่ละกระบวนการผลิตจะสามารถรับค่าความกระด้างได้แตกต่างกัน หรือบางอุตสาหกรรมไม่สามารถให้น้ำที่ใช้ในกระบวนการมีค่าความกระด้างในกระบวนการผลิตได้สูงถึง 135 mg/L as CaCO<sub>3</sub> แต่ในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.3 ปริมาณน้ำร้อนที่ใช้เพื่ออุตสาหกรรมต่างๆ

ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม	ปริมาณน้ำที่ต้องการ(m <sup>3</sup> /ton)
โรงงานเบียร์	20-30
โรงงานผลไม้มักกระป๋อง	12-25
โรงงานผักกระป๋อง	6
โรงงานเนื้อกระป๋อง	70
โรงงานปลากระป๋อง	20
โรงงานฆ่าสัตว์ (วัว สุกร )	5-15
โรงงานฆ่าไก่	10-20
โรงงานฟอกหนัง	20-140
โรงงานผลิตกระดาษ	
เยื่อกระดาษ	30
กระดาษทำกล่อง	40
กระดาษพิเศษ	500
โรงงานทอผ้า	
ผ้าฝ้าย	15-200
ผ้าใยสังเคราะห์	400-1,000
โรงงานผลิตภัณฑ์เคมี	200-1,000
โรงงานกลั่นน้ำมัน	0.1-40
โรงงานเหล็กกล้า	6-300
โรงงานเหล็กม้วน	400
โรงงานอลูมิเนียม	1,300

ที่มา : เครื่องศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2536)

ที่มีการใช้น้ำเพียงเข้าหม้อไอน้ำ สามารถรับค่าความกระด้างที่ต่ำมาก หรือน้ำแทบจะต้องไม่มีค่าความกระด้างเลย เช่น โรงพลังงานไฟฟ้าจากไอน้ำ เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อระบบการแลกเปลี่ยนความ

ร้อน เกิดคราบตะกรันบนพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และสูญเสียพลังงานมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้หม้อต้มไอน้ำเกิดการระเบิดขึ้นได้ (Mustapha et al., 2016)

ตารางที่ 2.4 ค่าความกระด้างที่เหมาะสม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

โรงงานอุตสาหกรรม	ความกระด้างทั้งหมด (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )
โรงงานอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง	25-75
โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ	<50
โรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนัง	<135
โรงงานอุตสาหกรรมทอผ้า	<20
น้ำหล่อเย็น	<50
น้ำเลี้ยงเข้าหม้อต้มไอน้ำ	<10

ที่มา : ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 (2524) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (2549)

## 2.4 เทคโนโลยีการกำจัดความกระด้าง

### 2.4.1 การตกตะกอน (Chemical precipitation)

หลักการของการกำจัดความกระด้างโดยวิธีนี้ คือ การเปลี่ยนไอออนละลายน้ำต่างๆ ที่สร้างความกระด้างให้เป็นของแข็ง โดยการเติมสารเคมีบางชนิดเพื่อให้เกิดการตกผลึกขึ้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้กำจัดความกระด้าง ได้แก่ ปูนขาว (CaO) และโซดาแอช (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เติมลงไป在水里ทำให้เกิดเกลือของแคลเซียม และแมกนีเซียมซึ่งไม่ละลายน้ำ ตกตะกอนลงมาและนำมากรอง สามารถกำจัดได้ทั้งความกระด้างชั่วคราว และความกระด้างถาวร แต่ต้องใช้พื้นที่ติดตั้งมาก มีการดูแลระบบค่อนข้างยุ่งยาก รวมถึงปรับเปลี่ยนค่าพีเอชให้เหมาะในการตกตะกอนของระบบ (Randtk and Hoeha, 1999) จึงไม่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำใช้เพื่อการอุปโภคบริโภค หรือในกรณีที่ไม่ต้องการลดความกระด้างจนเหลือศูนย์ น้ำที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วจะมีความกระด้างเหลือประมาณ 30-35 mg/L as CaCO<sub>3</sub> (Qasim et al.,2000)

จากการศึกษาหลากหลายงานวิจัย พบว่า การใช้การตกตะกอนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดค่าความกระด้างให้หมดไปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งการตกตะกอน โดยใช้สารเคมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำกระด้างจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยส่วนใหญ่แล้วจะสามารถตกตะกอนได้ดีที่พีเอชมากกว่า 8 หรืออยู่ในสภาวะความเป็นด่างนั่นเอง

ตารางที่ 2.5 การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการตกตะกอน

แหล่งน้ำ	ชนิดสารเคมี	ปริมาณสารเคมี (mg/L)	ความกระด้างทั้งหมด		ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	พีเอช	อ้างอิง
			น้ำเข้า	น้ำออก			
Tehran Refinery	Ca(OH) <sub>2</sub>	500	678	100	85	9.2	Zadghaffari and Asr (2013)
	NaOH			18	97	10.8	
Nissan WTP	CaO	200	352	226	36	10.25	Nasser and Ali (2006)
Al-Karama WTP		300	507	334	34	9.3	
Al-Wathba WTP		300	488	322	34	9.8	
-	CaO	90-120%	332	160	51.8	10.5	Dey st al., (2007)
น้ำบาดาล อำเภอศรี เมืองใหม่ จังหวัด อุบลราชธานี	NaAlO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600	986.4	121.6	87	8.8	อมรรัตน์ (2014)
	NaAlO <sub>2</sub>	600		443.94	55	8.67	
	CaO	100		786.8	20	7.36	
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	800-1,000		349.64	64	9.5	
	Aluminum	1,000		808.86	18	6.8-4.4	

#### 2.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกจับโดยสารแลกเปลี่ยนไอออน หรือเรซิน (Resin) ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคลไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation Exchanger) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion Exchanger) วิธีนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชยกรรม เนื่องจากใช้พื้นที่ติดตั้งระบบต่ำ ควบคุมง่าย และสามารถกำจัดน้ำกระด้างให้หมดไปหรือมีค่าต่ำๆได้ เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งานคือ ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรวดอ่อน นิยมใช้ตัวแลกเปลี่ยนไอออนในรูปของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โดยโซเดียมไอออนจะถูกแทนที่ด้วยแคลเซียมหรือแมกนีเซียมไอออนในเรซิน เมื่อใช้งานเรซินไปสักระยะ ก็จะมีแต่ไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมเกาะอยู่บนผิวของซีโอไลต์ จึงทำให้ประสิทธิภาพของเรซินลดลง จึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยใช้เกลือแกง ( $\text{NaCl}$ ) เข้มข้น 8-15% ซึ่งในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินจะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงถึง 40,000-150,000 ppm. (U.S Department of the Interior, 2002) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องใช้จ่ายเงินจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการนี้ด้วย การแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่างๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะกับ สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมากๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จำเป็นต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำ เสียก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิบัติการ จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า การใช้การแลกเปลี่ยนไอออนเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างมากกว่า 50% แต่ยังไม่สามารถลดค่าความกระด้างให้เหลือต่ำๆได้ หากบำบัดที่ค่าความกระด้างสูงๆ จำเป็นต้องใช้ร่วมกับระบบเมมเบรนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้สูงขึ้น ดังเช่นงานวิจัยของ Deavenport et al. (2013) ใช้แคลไอออนเรซินร่วมกับระบบนาโนฟิลเตรชันในการกำจัดน้ำกระด้าง ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพสูงถึง 97% โดยสามารถลดค่าความกระด้างให้เหลือ 9-13 mg/L as  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งถือว่าเป็นน้ำอ่อน สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมกระดาษได้ เป็นต้น (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61, 2524)

แต่ในปัจจุบันมีการนำวัสดุจากธรรมชาติ มาดัดแปรเพื่อใช้ในการกำจัดไอออนต่างๆในน้ำ โดยใช้กลไกในการแลกเปลี่ยนไอออน Deng and Ting. (2005) ศึกษาการใช้จุลชีพ ดัดแปรโดย

กระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของกรดอะซิติก ซึ่งเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพในการกำจัด Cu(II) และ Cd(II) จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับไอออน Cu(II) และ Cd(II) เท่ากับ 1.70 และ 1.87 mmol/g ซึ่งกลไกในการกำจัดโลหะหนักนี้ เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะหนักและโปรตอน (H<sup>+</sup>) ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH)

#### 2.4.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane filtration)

ปัจจุบันกระบวนการเมมเบรนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายๆด้าน เช่น การบำบัดน้ำ การลดแบคทีเรียในน้ำดื่ม การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล การทำให้เข้มข้นในผลิตภัณฑ์นม การทำให้น้ำผลไม้ปลอดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเมมเบรนมีคุณภาพด้านสี กลิ่น และรสชาติที่ดีกว่ากระบวนการอื่นๆ เป็นต้น (Girard and Fukumoto, 2000) ข้อดีของกระบวนการเมมเบรน คือ สามารถแยกสารละลายโดยไม่ต้องใช้สารเคมีในกระบวนการแปรรูป สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้หมด และค่าบำรุงรักษาต่ำ

หลักการของกระบวนการของกระบวนการเมมเบรนที่ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อน คือ สารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนโดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อนสาร เนื่องจากผลต่างของความดันระหว่างเมมเบรน (Trans membrane pressure, TMP) ส่วนตัวถูกละลายจะถูกเมมเบรนกักไว้ เรียกว่า “รีเทนเทท” หรือ “สารละลายเข้มข้น” ส่วนตัวทำละลายและตัวถูกละลายบางส่วนที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า “เพอเมอเทท” ส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นรีเทนเทท หรือเพอเมอเทท หรือทั้งสองส่วนขึ้นอยู่กับความต้องการของการนำไปใช้ประโยชน์ การกรองโดยใช้เมมเบรนระดับต่างๆ ได้แก่ ระดับไมโครฟิลเตรชัน (MF) อัลตราฟิลเตรชัน (UF) นาโนฟิลเตรชัน (NF) และออสโมซิสผันกลับ (RO) เป็นต้น

##### 2.4.3.1 ไมโครฟิลเตรชัน (MF)

ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองที่มีแผ่นรูพรุนขนาด 5-1000 nm สำหรับแยกโมเลกุลใหญ่ เช่น สารแขวนลอย หรืออนุภาคเล็กๆ ออกจากของเหลว แรงขับเคลื่อนที่ใช้อยู่ระหว่าง 1-5 atm ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น Cellulose acetate, Polysulfone และ Polystyrene เป็นต้น กระบวนการไมโครฟิลเตรชันนิยมใช้สำหรับการบำบัดน้ำทิ้ง การกำจัดสารแขวนลอยที่เป็นสาเหตุความขุ่นของน้ำ และอาจใช้ร่วมกับกระบวนการหมักเพื่อแยกเซลล์จากผลิตภัณฑ์ โดยไม่นิยมใช้ในการกำจัดความกระด้างในน้ำ เนื่องจากขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถกำจัดไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ จำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นร่วมด้วย เช่นการเติมสารก่อตะกอนและพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารของเมมเบรน

ตารางที่ 2.6 การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน

พารามิเตอร์	หน่วย	Comstock and Boyer, 2014		Apell and Boyer, 2010		Pentamwa et al., 2011		Lazar et al., 2014		Arias-Paic et al., 2015	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
พีเอช	-	7.2-7.5	-	7.6	7.7	6.7	-	7.1	-	7-8	-
ค่าความเป็นด่าง	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	250-320	-	244	-	-	-	-	-	100-240	-
แคลเซียมไอออน	mg/L	-	-	-	-	-	-	151.02	17.523	-	-
ความกระด้างทั้งหมด	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	300-440	9-13	275	112	440	246	-	-	500	56
ซัลเฟต	mg/L	17-130	-	20.9	1.1	-	-	-	-	18.8-116.8	-
เรซิน	-	A200C resin (cation resin) + NF		MIEX (Anion and cation resin)		Polystyrene foam		Purolite C100E		Amlaerlite 200C-Na	
ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง	%	97		>55		44		91.98		>88	

### 2.4.3.2 อัลตราฟิลเตรชัน (UF)

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คอลลอยด์ จุลินทรีย์ น้ำตาล และสารอื่นๆที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 300-500,000 ดาลตัน (Da) ออกจากน้ำ โดยความดันที่ใช้ในการส่งสารผ่านเมมเบรนอยู่ในช่วง 2-10 บาร์ และมีขนาดรูพรุนของเมมเบรน 2-10 nm ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กัน โดยทั่วไป เช่น Cellulose acetate, Polyacrylonitrile และ Polyester เป็นต้น กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเหมาะสำหรับการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้น โปรตีน การกำจัดคอลลอยด์ การบำบัดน้ำทิ้ง การทำน้ำให้บริสุทธิ์ และการทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น ใช้พลังงานในการเดินระบบที่ต่ำ และไม่สิ้นเปลืองพื้นที่ในการติดตั้ง อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลทินน้ำได้ค่อนข้างสูง ปัจจุบันจึงได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรม

### 2.4.3.3 นาโนฟิลเตรชัน (NF)

กระบวนการนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายออกจากน้ำ เทคโนโลยีนาโนฟิลเตรชันส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (Mohammad, Othaman and Hilal et al., 2004) ข้อดีของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน คือ สามารถใช้งานในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้กว้างตั้งแต่ 3-8 และใช้แรงดันน้อยกว่ารีเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน อีกทั้งยังมีความเหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมากกว่าอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน และรีเวิร์สออสโมซิสเมมเบรน แต่ไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้กำจัดโลหะหนักและน้ำกระด้าง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งการกำจัดน้ำกระด้างด้วยกระบวนการนี้ ยังไม่สามารถกำจัดน้ำกระด้างให้มีค่าต่างๆได้ (Bergman, 1995) และไม่เหมาะกับน้ำกระด้างที่มีค่าความกระด้างสูงๆ จำเป็นต้องได้รับการบำบัดมาในขั้นต้นก่อนเข้าสู่เมมเบรน เพื่อลดภาระของเมมเบรน ป้องกันการอุดตันและการเสื่อมสภาพของเมมเบรนเร็วขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้วระบบนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำกระด้างมากกว่า 60% ดังตารางที่ 2.7

### 2.4.3.4 ออสโมซิสผันกลับ (RO)

กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส ใช้แรงดันในการแยกสารต่างๆ ซึ่งสามารถแยกสารอินทรีย์ได้ทุกชนิด และแยกสารอนินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการกำจัดไอออนในน้ำได้สูง ประสิทธิภาพของ RO ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ (Ujang and Anderson et al., 1996) กระบวนการนี้ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตน้ำดื่ม มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำกระด้าง โดยสามารถลดค่าความกระด้างให้ต่ำลงได้โดยไม่ต้องใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ ส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า 90% ดังตารางที่ 2.8 แต่ไม่เหมาะกับน้ำกระด้างที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจาก



จะเกิดการอุดตันในระบบได้ง่าย จึงเหมาะกับน้ำกระด้างที่มีความเข้มข้นต่ำๆ และ RO มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบสูง ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่สิ้นเปลืองที่ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการน้ำที่ผ่านการบำบัดที่สะอาดมากนัก จึงไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียและกำจัดน้ำกระด้าง (Cuda et al., 2006)

ตารางที่ 2.7 การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

แหล่งน้ำ	ความดัน (psi)	TDS (mg/L)		Total hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้าง (%)
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	
Lower Tamiami	110	420	140	260	80	69
Upper Florid	105	450	300	240	90	62.5
Surficial	105	360	90	255	50	80
Shallow wells	100	500	170	250	70	72
Ground water	145	-	-	280	14	95

ที่มา : Bergmam (1995) และ Bruggen et al., (2001)

ตารางที่ 2.8 การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ

แหล่งน้ำดิบ	ความดัน (psi)	TDS (mg/L)		Total hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		ประสิทธิภาพ (%)	Color (CU)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก		น้ำเข้า	น้ำออก
Biscayne	130	480	35	310	20	93.5	65	<5
Shallow wells	155	480	285	230	130	43.5	75	<5
Floridan	110-120	910	230	310	30	90.3	-	-

ที่มา : Bergmam, (1995)

#### 2.4.4 การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลา สามารถกำจัดไอออนสารออกแกนิค คอลลอยด์ รวมทั้งการแยกอนุภาค น้ำมัน และโลหะหนักออกจากสารละลายได้ (Escobar et al., 2006; Emamjomeh and Sivakumar., 2009; Holt et al., 2002 และ Chou et al., 2009)

วิธีการนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูง แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก และมีราคาค่าก่อสร้างสูง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนจะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ และความต่างศักย์ร่วมด้วย ดังตารางที่ 2.9 โดยวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างสูงถึง 98.2% (Malakootian et al., 2010) แต่ไม่นิยมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ไม่คุ้มทุนในการบำบัด เป็นต้น

#### 2.4.5 การดูดซับ (Adsorption)

ในปัจจุบันกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูงในปัจจุบันในการกำจัดไอออนโลหะ และโลหะหนักชนิดต่างๆ เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและมีเสถียรภาพสูง อีกทั้งยังสามารถแยกส่วนของตะกอนออกไปกำจัดได้ง่าย หรือสามารถนำโลหะหนักบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ (Metal recovery) ด้วยการดิซอฟชั่น (Desorption solution) ออกจากสารดูดซับ (Bade et al., 2008; Cheng et al., 2009) ตัวดูดซับที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ไคโตรซาน แตนินินเจล และโพลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น Nah et al. (2006) ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วด้วยเหล็กออกไซด์ (iron oxide) พบว่า สามารถดูดซับตะกั่ว (II) ได้ถึง 123 mg/g ที่ช่วงพีเอชระหว่าง 5-11 ซึ่งมากกว่าความสามารถในการดูดซับด้วยดินเหนียวและถ่านกัมมันต์ El-Sayed (2010) ศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำโดยใช้เปลือกถั่วลิสงเป็นตัวดูดซับ ซึ่งสามารถดูดซับได้มากที่สุดที่พีเอช 4 และจากนั้น Rolence et al. (2014) ใช้เปลือกจากกะลามะพร้าวเผาเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับน้ำกระด้างสังเคราะห์ และน้ำกระด้างจากธรรมชาติ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุดคือ 60% และ 55% ตามลำดับ ที่พีเอช 6.3 ซึ่งจากที่กล่าวมา จะเห็นว่าในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวดูดซับจากธรรมชาติมากมาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการซื้อวัสดุดูดซับราคาแพง โดยประสิทธิภาพในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ พีเอช ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจใช้แป้งมันสำปะหลังโมดิฟายด์ในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา เพื่อเป็นการใช้วัสดุจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

#### 2.5.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำ ให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า วัสดุดูดซับ (Adsorbent) การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง และ ของเหลวกับของแข็ง โดยใน

ที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลวกับของแข็ง (Liquid – Solid Interface) ในการดูดติดผิว โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับ ผิวภายในโพรงของวัสดุดูดซับและมีเพียงส่วนน้อย เท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำ ไปหาวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึง หยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำ จะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไป เกาะจับอยู่กับวัสดุดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี (เดชา นัตรศิริเวช, 2552)

### 2.5.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมี ระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ เรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) (เดชา นัตรศิริเวช, 2552)

#### 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) มักจะเกิดในสถานะอุณหภูมิต่ำๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

#### 2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของ โครงสร้างของแข็งเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่าง ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้า ของตัวดูดซับหลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer) (จตุพรและนุรกิจ, 2547)

ตารางที่ 2.9 การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการแยกด้วยไฟฟ้าเคมี

พารามิเตอร์	หน่วย	Malakootian et al. (2010)		Li et al. (2013)		Kandasamy et al. (2016)		Malakootian and Yousefi (2009)	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ความกระด้างทั้งหมด	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	300	5.4	797	391	1020	175	464	20.5
ความขุ่น	NTU	3	-	66	3	-	-	-	-
การนำไฟฟ้า	mS/cm	1.612	-	5.8	-	-	-	-	-
พีเอช		8.1	10	8.35	8	5.2	-	7	10.1
ระยะเวลา	นาที	60		9		45		60	
ความต่างศักย์	V	12		9		25		20	
ขั้วไฟฟ้าแอโนด	-	Iron-rod electrode		Ti/RuO <sub>2</sub> -IrO <sub>2</sub>		Aluminum Sheet		Aluminum Sheet	
ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง	%	98.2		51		82.84		95.6	

ตารางที่ 2.10 การกำจัดน้ำกระด้างด้วยการดูดซับ

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	พีเอช	ความกระด้าง เริ่มต้น (mg/L)	ความสามารถ ในการดูดซับ (mg/g)	ระยะเวลา สัมผัส (min)	อุณหภูมิ (°C)	ไอโซเทอม	อ้างอิง
Eicchornia Crassipes carbon	Ca (II)	-	38.87	26.86	90	-	-	Kannan and Mani (2015)
	Mg (II)	-	14.09	8.02				
Polystyrene divinul benzene	Ca (II)	6	-	7.54	90	-	Langmuir	Fathy M. (2015)
	Mg (II)	8	-	1.23				
Sugar beet pulp	Ca (II)	8	927-1127	20.23	120	45	Langmuir	Qin et al. (2015)
Activated (Melon Husk)	Ca (II)	7	75	1.8	20	-	-	Mustapha et al. (2016)
	Mg (II)	-	42	1	25	-		
Phyllanthus emblica wood	Ca (II)	-	92.17	13.22	90	30	-	Kannan and Mani (2014)
	Mg (II)	-	68.05	9.48				
Cashewnut shell activated carbon	Total hardness	9	1214.8	384	30	30	Frundlich	Rolence C. (2016)

### 2.5.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบๆ วัสดุดูดซับ และการแพร่ในโพรงวัสดุดูดซับไปยังพื้นผิววัสดุดูดซับ ตามลำดับขั้นตอนการแพร่ ขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดจลนพลศาสตร์ หรืออัตราการดูดซับของระบบดูดซับนั้นๆ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order model) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order model) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของวัสดุดูดซับ และในส่วนของกรณีอธิบายขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน จะใช้สมการการแพร่ภายในรูพรุนอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ (intraparticle diffusion)

- สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จากสมมุติฐานการดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับ เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุดูดซับกับโมเลกุลสารถูกดูดซับ และการดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมี 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 เวลาใดๆ (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  $t$  จะให้ความชัน เท่ากับ  $-k_1/2.303$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$

- สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีสมมุติฐานว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับ เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็น การดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สามารถเขียนอัตราการดูดซับ ได้ดังนี้

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

โดยที่  $k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (นาที<sup>-1</sup>)  
 เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.3) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t = 0$  จนถึง  $t = t$  และตั้งแต่  $q_t = 0$  จนถึง  $q_t = t$  จะได้  
 สมการที่จัดอยู่ในรูปสมการเชิงเส้น คือ

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_t$  กับ  $t$  จะได้ความชัน เท่ากับ  $1/q_c$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_2 q_c^2$

- การแพร่ภายในรูพรุน จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย สมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย ซึ่งสมการของ Weber และ Moriss สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$q_t = k_1 t^{0.5} + c \quad (2.5)$$

โดยที่  $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{0.5}$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $k_1$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า  $C$  มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

#### 2.5.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความเข้มข้นของสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

##### 1) ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2.6)

$$Q_e = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.6)$$

โดยที่  $Q_e$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล  
 $Q^0$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว  
 $b$  = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

$$\text{หรือ} \quad \frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2.7)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $C_e/Q_e$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน  $C_e/Q_e$  เป็น  $1/bQ^0$  และมีความชันเท่ากับ  $1/Q^0$

## 2) ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (2.8)

$$Q_e = \frac{X}{m} = K_F C_e^{1/n} \quad (2.8)$$

โดย  $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล  
 $X/m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ  
 $K_F$  คือค่าคงที่ของฟรุนดิช มีหน่วยเป็น ลิตรต่อกรัม และ  $n$  คือค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ ไม่มีหน่วย สามารถจัดสมการ (2.8) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการ

$$\log Q_e = \log \frac{X}{m} = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.9)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_e$  ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า  $K_F$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$

บางกรณีที่พล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_e$  แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบน ไปจากสมการของฟรุนดิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง



### 2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดบนวัสดุดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ในโพรงและพื้นผิวของวัสดุดูดซับ การถ่ายเทโมเลกุลของสารจากน้ำไปยังวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล ณ จุดสมดุล ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

1) ความเร็วรอบในการปั่นกววน Dogan et al. (2009) พบว่า อัตราเร็วของการปั่นกววนในช่วง 200-400 รอบต่อนาที ไม่มีผลต่อการทดลองดูดซับของเมทิลลีนบลู ซึ่งความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองนั้นมีค่าสูง ทำให้อัตราเร็วของการปั่นกววนไม่มีผลต่อการดูดซับ เนื่องจากการปั่นกววนด้วยความเร็วรอบสูงทำให้ลักษณะการผสมของสารละลายเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) แต่หากใช้ความเร็วรอบในการปั่นกววนต่ำ ความเร็วรอบอาจมีผลต่อระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับได้ เนื่องจากการผสมของสารละลายอาจจะเกิดไม่สมบูรณ์

2) ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ในกระบวนการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะถูกดึงออกจากน้ำไปเกาะติดอยู่กับวัสดุดูดซับ หากตัวถูกดูดซับมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี แรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำกับตัวถูกดูดซับจะมีค่าสูง ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะดึงให้ตัวถูกดูดซับไปเกาะติดอยู่กับวัสดุดูดซับ

3) ขนาดของตัวถูกดูดซับ ขนาดของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับที่ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในโพรงของวัสดุดูดซับ จากการศึกษา (Dogan et al., 2009) ใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันแต่มีขนาดต่างกัน พบว่า ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีกว่า การดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อ ขนาดของตัวถูกดูดซับมีความใกล้เคียงกับขนาดของโพรงของวัสดุดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างมวลของตัวถูกดูดซับและวัสดุดูดซับจะมีค่าสูงสุด ขนาดอนุภาคที่เล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายมาก การดูดซับจึงเกิดได้ดี

4) พีเอช มีผลต่อความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนและความสามารถในการละลายน้ำของไอออนโลหะ และส่งผลต่อประจุตรงข้ามของหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับด้วย เมื่อพีเอชต่ำ จะทำให้พื้นที่ผิวบริเวณรอบตัวดูดซับมีปริมาณของ  $H^+$  เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนจะมีผลต่อจำนวนโลหะที่ติดอยู่บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ Rolence et al. (2014) พบว่าเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับความกระด้างทั้งหมดด้วยถ่านจากกะลามะพร้าวมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจาก พีเอชสูง ปริมาณของ  $OH^-$  เพิ่มขึ้น ส่งให้บริเวณตัวดูดซับมีความเป็นลบ จึงสามารถดูดจับไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมได้เพิ่มขึ้น ในการศึกษาของ Hassan et al. (2014) ใช้การคัดแปรโคโคซานในการดูดซับไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม ผลการศึกษาพบว่า ที่พีเอช 3 สามารถดูดซับโลหะได้ดีที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่ม

สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำลง เนื่องจาก เมื่อพีเอชเพิ่ม หมู่ฟังก์ชันอะมิโน  $\text{NH}_2$  จะเกิดการโปรโตเนตเป็น  $\text{NH}_3^+$  ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียมและแมกนีเซียม ไอออนลดลง จากงานวิจัยทั้งสองพบว่า ค่าพีเอชจะมีผลต่อหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการดูดซับได้

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ โดยอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงตามที่อุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (มันลิน ตันทุลเวสม์, 2550) แต่การดูดซับในของเหลวนี้ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีน้อยมาก เนื่องจากของเหลวมีความจุความร้อนสูง ดังตัวอย่างการศึกษาการดูดซับสีย้อม (Dogan et al., 2009) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ (Alcoholic) คาร์บอนิก (Carbonylic) และฟีนอลิก (Phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับ ทำให้เกิดแรงดึงดูดกับระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนตัวดูดซับกับประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อมบางชนิด

6) ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ การเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากแรงขับเคลื่อนที่มากอันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายกับปริมาณไอออนโลหะบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ซึ่งภายหลังจากเข้าสู่สมดุลแล้ว ระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบใดๆ กับระบบ (Liang et al., 2008) การศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้แป้งคลอสติค (Sancey et al., 2011) พบว่า เมื่อทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 5-120 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักเริ่มคงที่ เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 40 นาทีเป็นต้นไป และการดูดซับโลหะหนักโดยใช้แป้งคาร์บอซีเมททิลจากข้าวโพด (Kim and Lim, 1999) โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส 0-30 นาที พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลาสัมผัส 10 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

7) ไอออนอื่น ๆ ในน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมจะพบว่ามีไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ ทั้งไอออนบวก และไอออนลบซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับ โดยไอออนลบ เช่น  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  เป็นต้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องจากไอออนประจุลบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับแทนที่ไอออนของโลหะหนัก ส่วนไอออนประจุบวก ถ้าในน้ำเสียมียไอออนประจุบวกที่มีความแข็งแรง (ionic strength) มากกว่า

ไอออนโลหะหนักไอออนเหล่านี้จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับวัสดุดูดซับได้ดีกว่าไอออนของโลหะหนัก

8) สารอินทรีย์ น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์มาก จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วย อีกทั้งสารอินทรีย์ยังสามารถก่อให้เกิดการสะสมตัวของฟิล์มหนาบบริเวณผิวของวัสดุดูดซับทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของโลหะหนักเข้าสู่วัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้ช้า และพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดการดูดซับลดลง ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจึงลดลงด้วย

จากตารางที่ 2.11 พบว่า กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไอออนในน้ำ โดยสามารถดูดซับไอออนได้ทั้งที่ความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่า 80% โดยมีหลากหลายวัสดุดูดซับจากธรรมชาติหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ในการดูดซับไอออน ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของตัวดูดซับ และอุณหภูมิ เป็นต้น

## 2.6 วัสดุดูดซับ

การศึกษาพัฒนาวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำ ที่เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูก ได้แก่ วัสดุทางธรรมชาติ ผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากภาคเกษตรกรรม และผลิตภัณฑ์พลอยได้หรือของเสียจากอุตสาหกรรม ขึ้นมาใช้งานในการกำจัดความกระด้าง พบว่า มีการศึกษาอยู่มากมาย โดยวัสดุดูดซับจากวัสดุทางธรรมชาติที่นิยมใช้ในการดูดซับ ได้แก่ ดินเหนียว ออกไซด์ และซีโอไลต์ แร่ดินเหนียว และออกไซด์มีอยู่มากมายหลากหลาย ซึ่งพบได้ทั้งในน้ำ และบนพื้นดิน มีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง สามารถดูดซับได้ทั้งไอออนประจุบวกและประจุลบ รวมถึงยังสามารถเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนได้นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวได้ด้วยการพัฒนาเป็นวัสดุผสม โพลีเมอร์ เรียกว่า ดินคอมโพสิต วัสดุดูดซับจากซีโอไลต์ธรรมชาติได้รับความสนใจในการใช้งานดูดซับ ด้วยคุณสมบัติที่ของวัสดุเองที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยมีงานวิจัยหลายงานที่สนใจใช้วัสดุจากธรรมชาติ เพื่อดูดซับความกระด้างในน้ำ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.12 โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับของวัสดุธรรมชาติอยู่ในช่วงพีเอช 6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับด้วย Sepchr et al. (2013) ศึกษาโดยใช้หินพัมมิสจากธรรมชาติและผ่านการโมดิฟายด์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พบว่า หินพัมมิสที่ผ่านการโมดิฟายด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนมากถึง 96% และ 93% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าหินพัมมิสจากธรรมชาติ

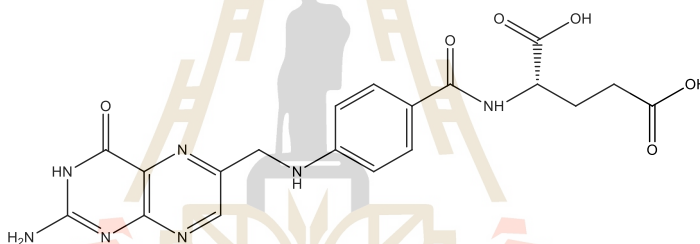
## 2.7 แป้งโมดิฟายด์

### 2.7.1 แป้งโมดิฟายด์ (modified starch)

หมายถึง แป้ง (starch) ที่ได้จากการนำแป้งธรรมชาติ (native starch) มาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น ความหนืด (viscosity) ลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน กรรมวิธีการผลิตแป้งดัดแปรโดยวิธีทางเคมี ภายภาพ เอนไซม์ หรือโดยจุลินทรีย์ แป้งที่นำมาใช้แปรรูปเป็นแป้งดัดแปร ได้แก่ แป้งจากมันสำปะหลัง (tapioca starch) แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า เป็นต้น

#### 2.7.1.1 แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจวบ

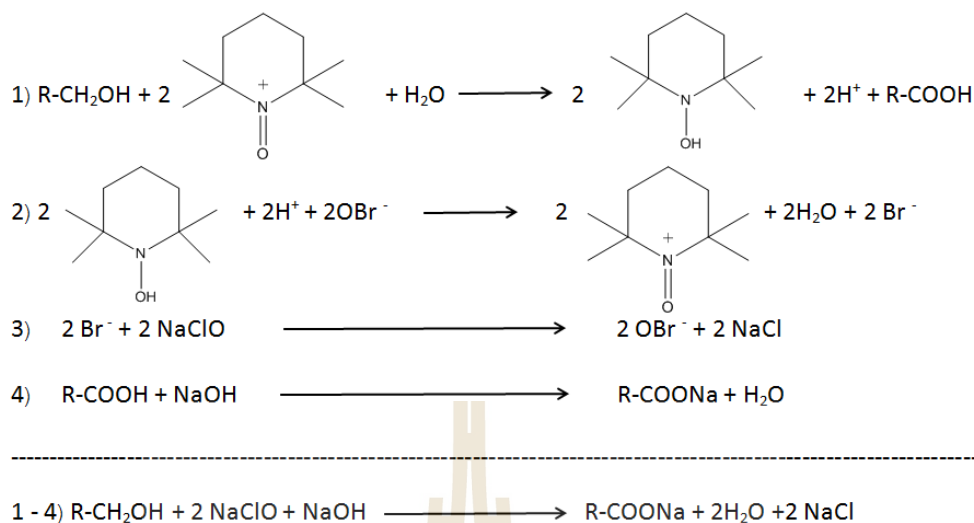
คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรพันธะทางเคมีด้วย ethylenediamine (ethylenediamine modified starch) ให้มีฟังก์ชันกรุปแบบ  $-NH_3^+$  และ  $=NH_2^+$  หรือ  $-Na^+$ ,  $-K^+$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจวบ

#### 2.7.1.2 แป้งโมดิฟายด์ชนิดประจวบ

คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรพันธะทางเคมีด้วย 2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl radical (TEMPO) ให้มีฟังก์ชันกรุปแบบ  $-COO^-$ , หมู่ฟอสเฟส, คาร์บอกซิล หรือมีหมู่  $-OH$  เมื่อละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ

### 2.7.2 ชนิดของแป้งโมดิฟายด์

1. แป้งโมดิฟายด์ด้วยกระบวนการทางเคมี เป็นแป้งโมดิฟายด์ส่วนใหญ่ที่มีการผลิตและใช้ในระดับอุตสาหกรรม เป็นแป้งที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยกระบวนการทางเคมี มีหลายชนิด ขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่ใช้ และระดับการดัดแปร (degree of substitution, DS) เช่น

- แป้งไฮดรอกซีโพรพิล (hydroxypropyl starch)
- แป้งครอสลิงคิง (cross-linked starch)
- แป้งแอซิเตต (acetate starch)
- แป้งคาร์บอกซีเมทิล (carboxymethyl starch) เป็นต้น

2. แป้งโมดิฟายด์ทางกายภาพ เป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้โครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ใช้พลังงานความร้อน หรือพลังงานจลน์ หรือทั้งสองอย่างประกอบกัน เมื่อโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งได้ถูกเปลี่ยนแปลงไป สมบัติของแป้งก็เปลี่ยนไปเช่นกัน แป้งในกลุ่มนี้ ได้แก่

- แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch)
- Granular cold water soluble starch
- Annealing starch
- Heat treatment starch
- Mechanical milling starch

ตารางที่ 2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับ

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	น้ำตัวอย่าง (mg/L)		พีเอช	ระยะเวลา สัมผัส (hr)	ความเข้มข้น ตัวดูดซับ (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (K)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	อ้างอิง
		น้ำเข้า	น้ำออก						
Coconut shell activated carbon	Total hardness	864	52	12	4	0.16	303	94	Rolence et al. (2014)
Modified Chitosan	Ca (II)	264	162.2	3	4	0.005	278	38	Hassan et al. (2014)
	Mg (II)	84	33.6					58	
Moringa Oleifera	Total hardness	314-362	60-130	8	24	20	298	80	Fahmi et al. (2011)
Carboxymethyl corn starch	Cu (II)	203	44	8	0.17	0.01	293	78.3	Kim and Lim (1999)
	Pb (II)	203	11.8					94.19	
	Cd (II)	194	1.9					99.02	
	Hg (II)	208	1.1					99.47	
Crosslink starch	Cu (II)	0.04-0.6	0-0.07	8	1	0.1	295	20-90	Sancey et al. (2011)
	Fe (II)	0.7-6.7	0.04-0.66					50-70	
	Zn (II)	5-50	0.1-4.8					20-90	

ตารางที่ 2.12 วัสดุดูดซับทางธรรมชาติ

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	pH	เวลา สัมผัส (hr)	ความสามารถในการดูดซับ	แหล่งอ้างอิง
Coconut shell activated Carbon	Total Hardness	6.3	6	60% และ 55% ตามลำดับ	Rolence, Machunda, and Njau (2014)
Natural pumices	Ca (II) และ Mg (II)	6.0	-	79% และ 51% ตามลำดับ	Sepehr et al. (2013)
Modified pumices			-	96% และ 93% ตามลำดับ	
Chemically modified cellulose (EMC)	Ca (II) และ Mg (II)	5.5	-	15.6 mg/g และ 13.5 mg/g ตามลำดับ	Jinior, Gurgel, and Gil (2010)
Sugar cane bagasse (EMMB)			-	46.1 mg/g และ 23.5 mg/g ตามลำดับ	
Commercial polyacrylic acid hydrogel beads (absorption)	Ca (II) และ Mg (II)	6.3	24	171.2 mg/g และ 193.6 mg/g ตามลำดับ	Saeed et al. (2013)
Activated carbon from tamarind seed (absorption)	Total hardness	-	0.25	12.41%.	Ruthairat (2014)

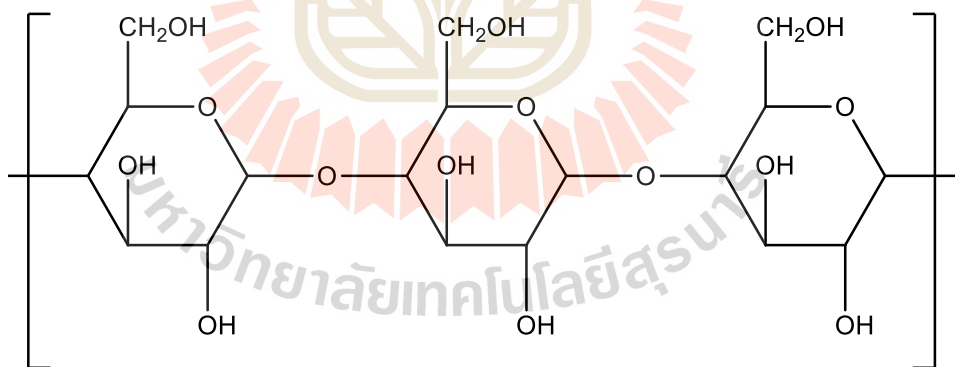
### 2.7.3 เกณฑ์ในการเลือกแป้ง

กระบวนการตัดแปรงแป้งในปัจจุบัน นิยมนำมาตัดแปรงด้วยวิธีทางเคมี โดยการแทนที่ในตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของแป้ง หมู่ฟังก์ชันที่นิยมนำมาตัดแปรง ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หมู่ฟอสเฟต ( $-PO_4^{3-}$ ) และหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) เป็นต้น ดังตารางที่ 2.13 แสดงตัวอย่างชนิดของแป้ง และหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการตัดแปรง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของแป้งจะสามารถบอกถึงแนวโน้มของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของแป้งได้ เช่น หมู่คาร์บอกซิล จะเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว และหมู่อะมิโนจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้า โดยในการกำจัดไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมนั้น การเลือกแป้งประจุลบ ก็จะทำให้มีแนวโน้มในการจับไอออนประจุบวกได้ดี ในการศึกษาจึงเลือกใช้แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ซึ่งเป็นแป้งประจุลบ ในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา

### 2.7.4 แป้งโมดิฟายด์ทางเคมี

ชนิดของแป้งโมดิฟายด์แต่ละชนิดมีกระบวนการตัดแปรงที่แตกต่างกัน เช่น กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้หมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละกระบวนการตัดแปรงส่งผลให้คุณสมบัติของแป้งเปลี่ยนไปจากเดิม เช่น ความหนืด การละลายน้ำ เป็นต้น ดังแสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) แป้งมันสำปะหลังไม่ตัดแปรง (non-modified starch) มีสูตรทางเคมี คือ  $C_{27}H_{48}O_{20}$  และมีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

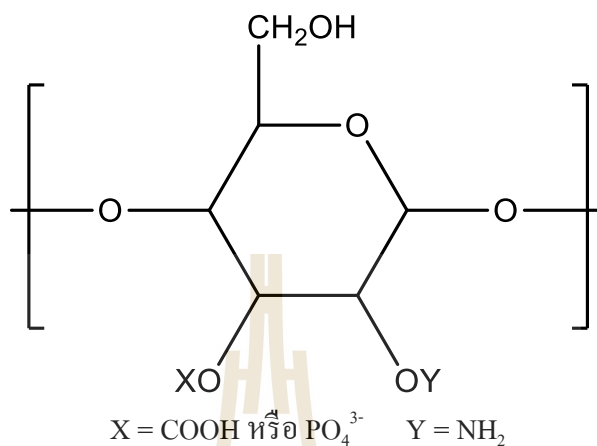
2) แป้งแอมโฟเทอริก (amphoterich starch) เป็นแป้งที่มีทั้งประจุบวกและลบ โดยที่ประจุบวกของแป้งเป็นประจุบวกจากเทอร์เทอริอะมิโน (tertiary amino) เป็นส่วนใหญ่ และประจุลบนิยมนำมาแทนที่ด้วยกลุ่มฟอสเฟต กลุ่มมาเลอิก และกลุ่มคาร์บอกซิล (Xu, Wang, Wu, Wang, and Li, 2006) เป็นต้น ในอุตสาหกรรมกระดาษนิยมใช้แป้งแอมโฟเทอริกในกระบวนการ wet end เพื่อช่วย



ตารางที่ 2.13 เกณฑ์ในการเลือกแป้ง

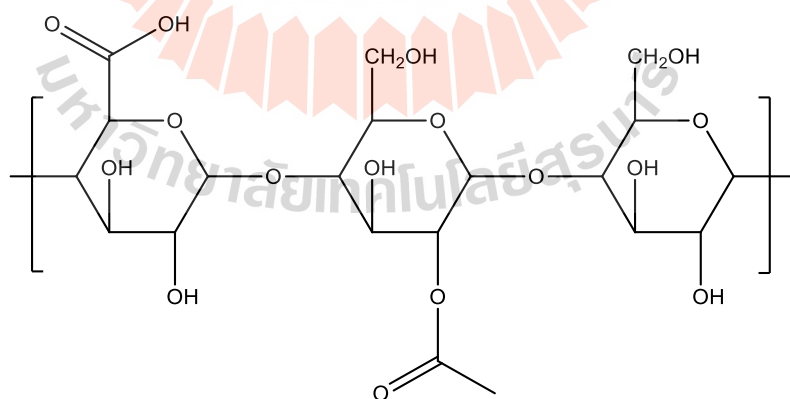
ชนิดแป้ง	เกณฑ์ในการเลือกแป้ง					
	ประจุ	%DS	pH slurry	หมู่ฟังก์ชัน	ขนาดโมเลกุล	การเกิดอนุพันธ์
1. Enzyme treated starch	ประจุลบ	-	3.5-5	OH	50-110 kilo Dalton	Pyro conversion
2. Phosphate monoester	ประจุลบ	0.07%	4-6.5	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	3-50 um	Esterification
3. Hydroxypropyl starch	ไม่มีประจุ	-	-	CH(OH)CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	3-50 um	Etherification
4. Starch sodium octenylsuccinate	ประจุบวก	-	-	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CHCH=CH <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> C=OC=O	-	Esterification
5. Carboxymethy starch	ประจุลบ	-	-	CH <sub>2</sub> -COOH	-	Etherification
6. Acetylate oxidized starch	ประจุลบ	-	-	CH <sub>3</sub> -C(=O)-	-	Esterification
7. Hydroxyethyl starch	ไม่มีประจุ	-	-	CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH	-	Etherification
8. Oxidized starch	ประจุลบ	0.03%	5-7	C(O)OH	3-50 um	Oxidation
9. Amino starch	ประจุบวก	-	10.5-12	(CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -NaCl	-	-
10. Cationic starch	ประจุบวก	-	4-6	CH <sub>2</sub> -N <sup>+</sup> (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Cl	-	Cross linked
11. Amphoteric	ประจุ	+0.31	-	COOH หรือ PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (Acid) และ NH <sub>2</sub> (Base)	-	Phosphorylate
	บวก/ลบ	-0.89				และ Oxidation

เพิ่ม retention และ drainage ซึ่งทำให้ผลผลิต (yield) เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดค่า BOD ของน้ำทิ้ง ทำให้เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แป้งแอม โฟเทอริก

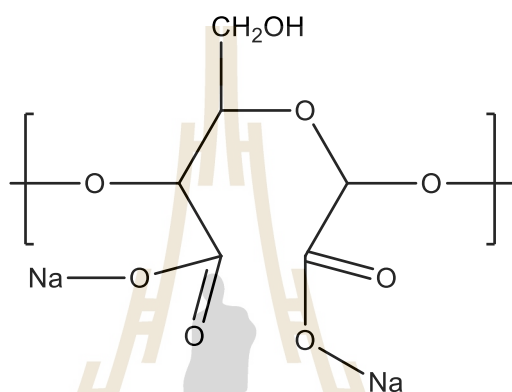
3) แป้งอะเซทิลเลทออกซิไดซ์ (acetylated oxidize starch) เป็นแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ ถูกดัดแปรด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite) ที่อุณหภูมิต่ำ (28-31 °C) จากนั้นเกิดกระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (esterification) ด้วยอะซิติก แอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) ในสภาวะต่างโดยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นสารเพิ่มความหนืด เช่น เยลลี่ เจลลาติน เป็นต้น มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แป้งอะซิทิลเลทออกซิไดซ์

4) แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch) แป้งออกซิไดซ์ หรือแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน สามารถผลิต หรือเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ได้แก่ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) แคลเซียมไฮโปคลอไรท์

(calcium hypochlorite) และแอมโมเนียม เปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate) เป็นต้น แป้งตัดแปรรด้วยวิธีการออกซิเดชัน โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นประจุลบ เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group, -COOH-) ที่แทรกอยู่ในโมเลกุลอะไมโลส (Amylose) ของแป้ง ทำให้แป้งมีสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) นอกจากนี้ สารออกซิไดซ์บางชนิดมีคุณสมบัติในการลดค่าสีของแป้งตัดแปรร ทำให้แป้งตัดแปรรมีความขาวเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยกำจัดจุลินทรีย์ในแป้ง ส่งผลให้กลิ่นของแป้งดีขึ้น โครงสร้างของแป้งดังรูปที่ 2.6

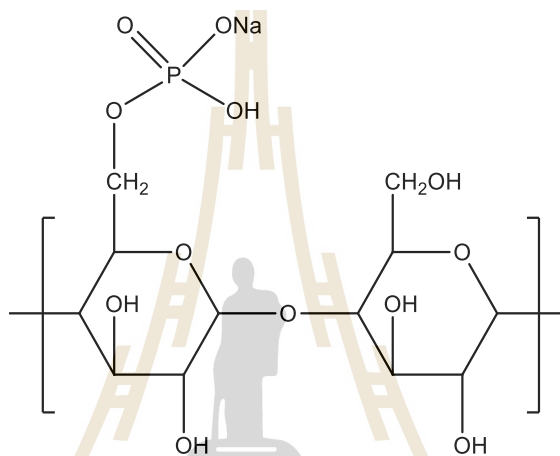


รูปที่ 2.6 แป้งออกซิไดซ์

5) แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (phosphate monoester starch) เป็นการตัดแปรรโดยใช้วิธีเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ในสภาวะกึ่งแห้ง (semi reaction) เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสในโมเลกุลด้วยหมู่ฟอสเฟต ( $P=O(OH)_2$ ) จากไตรโพลีฟอสเฟตโดยการเกิดปฏิกิริยาฟอสโฟรีเลชัน (phosphorylation) ในสภาวะต่างได้ผลิตภัณฑ์แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ สูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 (Thomas and Atwell, 1999) โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ ออโท-ไฟโร- หรือไตรโพลีฟอสเฟตโดยมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างในแป้งได้ไม่เกินร้อยละ 0.4 การศึกษาของ Muhammad et al. (1999) ทดลองผลิตแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์จากแป้งมันสำปะหลัง พบว่า กระบวนการผลิตแป้งที่ค่าพีเอช 6.0 ทำให้ระดับการแทนที่สูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ความเป็นกรด-ด่างที่พีเอชมากกว่า 9.0 ทำให้แป้งเกิดพันธะการเชื่อมข้าม (cross-linking) ขึ้นด้วย โดยค่าระดับการแทนที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้ขนาดของโมเลกุลแป้งใหญ่ขึ้น (Sitohy and Ramadan, 2001)

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นแป้งตัดแปรรที่มีสมบัติของประจุลบ มีความหนืดสูงขึ้นตามระดับการแทนที่ มีลักษณะเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดี ปัจจุบันนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร สามารถใช้ในการผลิตขนมปัง พุดดิ้ง เกรวี่ ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์สำหรับ

น้ำส้มสายชู มาของเนส สามารถใช้เป็นสารเพิ่มความความชื้นหนืด และในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ ใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะในองค์ประกอบของสารเคลือบ ทั้งนี้เนื่องด้วยเป็นแป้งที่มีประจุลบจึงสามารถจับยึดกับสารที่มีประจุบวกในองค์ประกอบสารเคลือบได้ดียิ่งขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์กระดาษบันทึกที่มีความร้อน (thermal recording paper) นอกจากนี้พบว่าการใช้แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ผสมกับแป้งดิบ บอแรกซ์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ในอุตสาหกรรมกระดาษสำหรับกระดาษลูกฟูก ทำให้กาวมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



รูปที่ 2.7 แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

ปัจจุบันมีการนำแป้งที่ดัดแปรทางเคมีโดยการแทนที่หมู่ฟอสเฟต เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย ดังเช่นในการศึกษาการดูดซับ Zn(II) ด้วยแป้งโครอสติลค์ฟอสเฟต พบว่า แป้งโมดิฟายด์มีความสามารถในการดูดซับ Zn(II) 2.00 mmol/g ที่พีเอช 4 (Guo et al., 2009) และการใช้แป้งฟอสเฟต คาร์บามेट ในการดูดซับ Pb(II) พบว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เท่ากับ 2.01 mmol/g ที่พีเอช 5 โดยไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ (Guo et al., 2006) อีกทั้งยังมีการศึกษาแป้งโมดิฟายด์มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.14 การดูดซับโลหะหนักประจุสองบวก ด้วยแป้งโมดิฟายด์ชนิดประจุลบ จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้สูง โดยค่าพีเอชส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 6-7 ขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการโมดิฟายด์แป้ง ส่วนระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส โดยอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงตามที่อุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2550) การดูดซับโดยใช้แป้งโมดิฟายด์ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย และไม่ก่อให้เกิดของเสียจากระบบอีกด้วย

ตารางที่ 2.14 การกำจัดโลหะด้วยแป้งโมดิฟายด์

ชนิดแป้ง	ตัวถูกละลาย	พีเอช	ระยะเวลา สัมผัส (hr)	อุณหภูมิ (°C)	ไอโซเทอม	ความสามารถในการ ดูดซับ		อ้างอิง
						การดูดซับ	หน่วย	
Crosslink Phosphate	Zn (II)	4	0.67	20	Langmuir	2.00	mmol/g	Guo et al., 2009
Phosphate carbamate	Pb (II)	5	0.4	20	Langmuir	2.01	mmol/g	Guo et al., 2006
Amphoteric	Cr (VI)	2.5	1	15	Langmuir	30.68	mg/g	Xu et al., 2002
Amphoteric	Cu (II)	6	1	20	Freundlich	84.4	mg/g	Feng et al., 2003
Amphoteric	Zn (II)	6	2	20	Langmuir	43.48	mg/g	Cao et al., 2003
Amphoteric	Pb (II)	4	1	20	Langmuir	152.74	mg/g	Xu et al., 2005
Oxidized	Cd (II)	3.2	24	20		9.88	mg/g	Soto et al., 2014
	Ni (II)					22.63	mg/g	
	Pb (II)					16.7	mg/g	
	Zn (II)					10.25	mg/g	
Oxidized	Ca (II)	8	0.4	30	Langmuir	1.561	mmol/g	Chen and Wang., 2006

ตารางที่ 2.14 แสดงการกำจัดโลหะด้วยแป้งโมดิฟายด์ (ต่อ)

ชนิดแป้ง	ตัวถูกดูดซับ	พีเอช	ระยะเวลาสัมผัส (hr)	อุณหภูมิ (°C)	ไอโซเทอม	ความสามารถในการดูดซับ		อ้างอิง
						การดูดซับ	หน่วย	
Carboxymethyl	Mn (II)	7	8	25	Freundlich	24	%	El-Hamshary et al., 2014
	Zn (II)					62	%	
	Cd (II)					68	%	
Amino	Cu (II)	7	2	30	Langmuir	29.4	mg/g	Dong et al., 2010
	Cr (VI)					12.5	mg/g	



## 2.8 แนวโน้มในการแยกแ่่งออกจากน้ำ

### 2.8.1 การกรอง (Filtration)

การกรองโดยไม่จำเป็นต้องกำจัดความขุ่นออกก่อน ด้วยกระบวนการ โคแอกกูเลชันและตกตะกอนสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือการกรองตรงที่ไม่ใช้สารเคมี และการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ซึ่งกระบวนการกรองตรงมีข้อดี คือ ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ค่าก่อสร้าง และขั้นตอนลงได้ แต่การกรองตรงทำให้ถังกรองต้องรับภาระในการกำจัดอนุภาคต่างๆ ในปริมาณมาก ซึ่งสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและทำให้ถังกรองอุดตันอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองทำให้ถังกรองอุดตันเร็ว (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2539) จึงได้มีการนำกระบวนการเติมอากาศร่วมกับกระบวนการกรอง เพื่อพัฒนาระบบการกรองตรงในการกำจัดอนุภาคของแข็งสังเคราะห์จากดินคาโอลิน (รัฐพล เกียรติวิริยะบุญญา, 2552) โดยพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น จึงลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานนานขึ้น สุภนุช ยังทรัพย์ และคณะ (2556) พบว่า ถังกรองทรายแบบกรองเร็วสามารถแยกอนุภาคความขุ่นได้ 96% ในขณะที่สามารถแยกอิมัลชันของน้ำมันได้เพียง 45% เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคความขุ่น และมีเสถียรภาพสูง จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าสู่ถังกรอง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม ประสิทธิภาพของถังกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟล็อกของสารส้มจับตัวกับอนุภาคน้ำมัน และสะสมอยู่ด้านบนและภายในช่องว่างของชั้นกรอง ทำให้ความพรุนลดลง ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดของอนุภาคภายในชั้นกรอง และจากการประยุกต์การเติมอากาศพบว่า สามารถช่วยลดการสะสมของอนุภาคต่างๆ ที่ผิวหน้าชั้นกรองได้ ทำให้สามารถใช้สารกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.8.2 การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้แยกขนาดอนุภาคเล็กออกจากน้ำ เช่น แ่่ง สารแขวนลอย เป็นต้น สารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือ Polyaluminium chloride (PACl) สารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) และปูนขาว (Calcium oxide) โดยถ้าโมเลกุลของอนุภาคมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของอนุภาคจะไม่สามารถทำได้ แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) เป็นต้น (ชนกฤต พรหมทอง, 2551)

การสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้น โดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเข้ามาจับเป็นกลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารส้มมีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นทั้งสารสร้างและรวมตะกอน ในขั้นแรกจะเติมปริมาณน้อยเพื่อให้ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน (Coagulant) ไปทำลายประจุลบ และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้นจะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) ซึ่งจะเป็นที่เกาะของอนุภาคต่างๆ ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) ซึ่งไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนช้าๆ และระหว่างที่ตกตะกอนก็จะดึงเอาสารแขวนลอยต่างๆ มาเกาะเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น จะมีประสิทธิภาพดีที่ความเป็นกรดต่างระหว่าง 5-7 ซึ่งปริมาณสารส้มที่ต้องใช้นั้นจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับลักษณะของน้ำ จึงจำเป็นต้องหาปริมาณที่ถูกต้องด้วยวิธีทดสอบการตกตะกอน (Jar Test) โดยการเติมสารเคมีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วเริ่มการกวนเร็วไม่เกิน 1 นาที แล้วเปลี่ยนความเร็วใบพัดมาทวนช้า ประมาณ 5-20 นาทีและหยุดให้เกิดการตกตะกอน (ไพศาล วิริกิจ, 2549) ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี ทำให้มีกากตะกอน (Sludge) จำนวนมากต้องกำจัดต่อไป สำหรับปูนขาว (CaO) การใช้งานส่วนใหญ่มักจะเติมพร้อมกับสารส้ม เพื่อให้สารส้มตะตะกอนและปูนขาวปรับค่าความเป็นกรดต่างให้กับน้ำ ส่วนสารประกอบเหล็กในรูปต่างๆไม่ค่อยได้รับความนิยม เพราะมีราคาแพงกว่าสารส้ม และตะกอนของเหล็ก ( $Fe(OH)_3$ ) ที่เกิดขึ้นอาจจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารพิษ (ไพศาล วิริกิจ, 2549)

### 2.8.3 อัลตราฟิลเตรชัน Ultrafiltration (UF)

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คอลลอยด์ จุลินทรีย์ น้ำตาล และสารอื่นๆที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 300-500,000 ดาลตัน (Da) ออกจากน้ำ โดยความดันที่ใช้ในการส่งสารผ่านเมมเบรนอยู่ในช่วง 2-10 บาร์ และมีขนาดรูพรุนของเมมเบรน หรือ Molecular weight cut-off (MWCO) อยู่ในช่วง 1-300 kDa (Baker, 2000) ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.15 โดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติได้ จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้ เช่น โปรตีน เป็นต้น กระบวนการของเมม



เบรณ ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟส ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีขนาดกะทัดรัด ไม่เปลืองพื้นที่ จึงได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

แป้งโมดิฟายด์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 3-50 um (บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด) ซึ่งอัตราฟิลเตรชันมีความสามารถในการแยกสารโมเลกุลใหญ่ออกจากน้ำ โดยมีขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองประมาณ 0.1-0.001 um ดังนั้น แป้งโมดิฟายด์จะมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านหรือผ่านเมมเบรณในระดับอัตราฟิลเตรชันได้น้อย อีกทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัตราฟิลเตรชันด้วยแป้งโมดิฟายด์ทำได้ง่ายตามท้องตลาด และเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายน้อย การเดินระบบไม่ซับซ้อน และเป็นการเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.8.3.1 ปัญหาที่ส่งผลต่อกระบวนการอัตราฟิลเตรชัน

ผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อฟลักซ์และการกักกันในระบบอัตราฟิลเตรชัน สามารถสรุปปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบได้ดังนี้

1) คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration polarization, CP) เป็นการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของเมมเบรณ ส่งผลให้บริเวณผิวหน้ามีความเข้มข้นสูงขึ้น เกิดเป็นชั้นเจลหรือชั้นเค้ก ทำให้ความต้านทานการไหลสูงขึ้น และค่าฟลักซ์ของสารละลายลดลง ส่งผลให้คุณสมบัติการกักกันสารของเมมเบรณเปลี่ยนไป แต่สามารถทำความสะอาดได้ โดยการใช้น้ำชะล้าง หรือปรับเปลี่ยนอัตราการไหลและแรงดันฟาวลิง (Fouling) ส่วนใหญ่จะเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้สมรรถนะของเมมเบรณเปลี่ยนไปในทิศทางลดลง เนื่องจากสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของฟลักซ์เพอมีเอทและอายุการใช้งานของเมมเบรณ โดยฟาวลิงจะแตกต่างจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน เนื่องจากฟาวลิงจะมีการสะสมและอุดตันของตัวถูกละลายทั้งที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรณ และไม่สามารถผันกลับได้ ส่งผลให้เมมเบรณมีขนาดรูพรุนที่เล็กลง จึงไม่สามารถทำความสะอาดได้โดยการปรับเปลี่ยนวิธีดำเนินการ เช่น การเพิ่มอัตราการไหลหรือการปรับความดัน แต่สามารถกำจัดออกได้โดยการใช้สารเคมีเท่านั้น

2) ความดัน (Pressure) ระบบกรองด้วยเมมเบรณจำเป็นต้องใช้แรงดันน้ำในการผลักโมเลกุลของน้ำหรือสารละลายขนาดเล็กให้ผ่านเมมเบรณไป แต่สำหรับสารละลายที่ประกอบด้วยสาร โมเลกุลใหญ่เมื่อมีการเพิ่มแรงดันจะทำให้อนุภาคเกิดการสะสมตัวกันหน้าผิวเมมเบรณเป็นสาเหตุหนึ่งของการอุดตัน

ตารางที่ 2.15 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

Ultrafiltration	
Membrane	Symmetric or Asymmetric
MWCO	$10^3$ - $10^6$ Da
Driving force	2-10 bar
Separation principle	Seiving mechanism
Separation goal	- Solution - Fractionation - Concentration
Application	- Analytical application - Sterilisation (food and pharmaceuticals) - Ultrapure water (semiconductors) - Clarification (beverage)

ที่มา : Kovasin (2002)

3) อัตราการไหล การเพิ่มอัตราการไหลในการบ่อนสารละลายมีส่วนช่วยลดการเกิดสะสมของสารหน้าผิวเมมเบรนและการอุดตันได้ จึงสามารถช่วยในการเพิ่มค่าฟลักซ์ได้

4) อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ฟลักซ์สูงเนื่องจากเกิดการขยายตัวของรูพรุนในเมมเบรน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกสารละลายและอาจมีอนุภาคที่ไม่ต้องการผ่านเมมเบรนออกไปได้

5) ความเข้มข้น ค่าฟลักซ์แปรผกผันกับความเข้มข้นเพราะในระบบที่ความเข้มข้นสูง โอกาสที่จะเกิดการสะสมหน้าผิวเมมเบรนสามารถทำให้เกิดการอุดตันหน้าผิวเมมเบรนได้

6) พีเอช ความเป็นกรดต่างของสารละลายมีผลต่อฟลักซ์และการกักกันของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน ได้อย่างมาก ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องเลือกเมมเบรนที่คุณสมบัติครอบคลุมในช่วงพีเอชของสารละลายที่เราต้องการแยก อีกทั้งค่าพีเอชสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการละลายของสารที่เราต้องการแยกได้

### 2.8.3.2 การประยุกต์ใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชันในอุตสาหกรรม

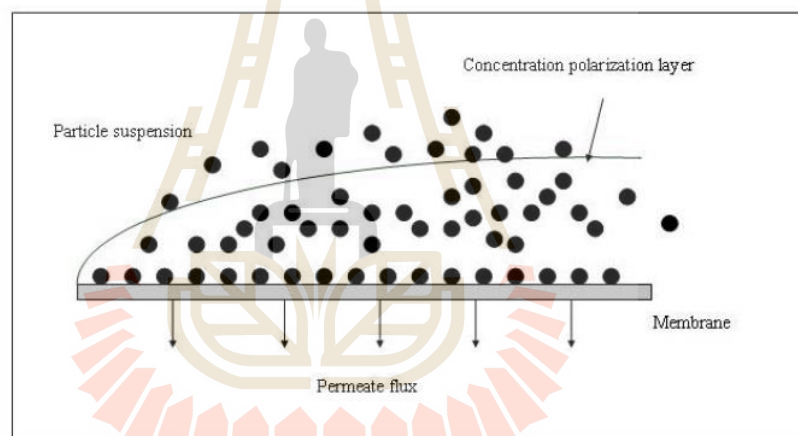
1) การทำให้เข้มข้น (concentration) เช่น อุตสาหกรรมนม เพื่อการผลิต โปรตีนเวย์ (whey) ที่อยู่ในรูปผง ใช้เพิ่มความเข้มข้น โปรตีนเวย์ในหางนมซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิต

เนยแข็ง (cheese) ก่อนนำไปทำผ่านเครื่องระเหย (evaporator) และนำไปทำแห้ง (dehydration) ด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drier)

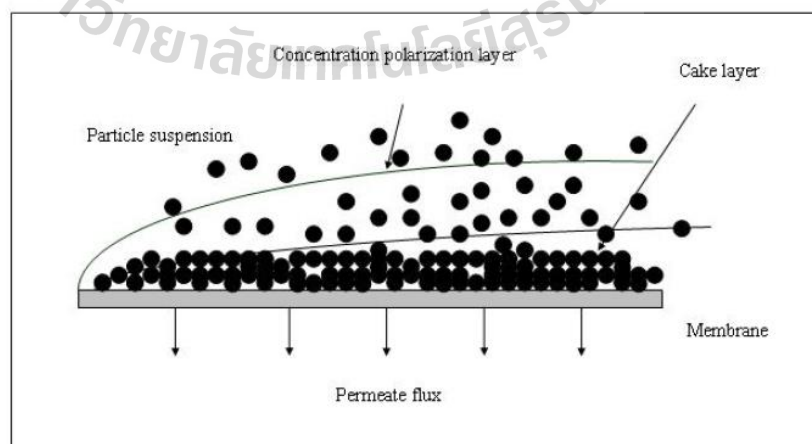
2) การทำให้ใส (clarification) เช่น การผลิตน้ำผลไม้ชนิดใส ได้แก่ น้ำแอปเปิ้ล น้ำองุ่น โดยใช้แทนการเหวี่ยงแยก (centrifuge)

3) การลดปริมาณจุลินทรีย์เพื่อการถนอมอาหาร และทำให้อาหารปลอดภัย โดยการแยกจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ ออกจากเครื่องดื่ม เช่น เบียร์ น้ำผลไม้

4) การบำบัดน้ำทิ้งและการผลิตน้ำสะอาด เช่น น้ำทิ้งที่มันน้ำมันอิมัลชันจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น ดังตารางที่ 2.7 แสดงถึงประสิทธิภาพของอัลตราฟิลเตรชันแบบหมุนในการกำจัดความขุ่น สี และสารอินทรีย์จากธรรมชาติ โดยพบว่า ระบบสามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่า 89%



รูปที่ 2.8 Concentration polarization



รูปที่ 2.9 Cake layer

ตารางที่ 2.16 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ชนิดเมมเบรน	MWCO (Da)	การกำจัด	ประสิทธิภาพ (%)	แหล่งอ้างอิง
อัลตราฟิลเตรชัน	10,000	ความขุ่น	99	Glucina et al. (2000)
	-	ความขุ่น	89	Kim et al. (2002)
	30,000	สารอินทรีย์ธรรมชาติ	80	Korbutowicz et al. (2006)
	50,000	DOC	25	Zularisam et al. (2007)
	5,000	สี	73	Odra River (2008)
สารอินทรีย์ธรรมชาติ		56		

### 2.8.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างให้สูงขึ้นในกระบวนการเมมเบรน

การเพิ่มการเติมสารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเมมเบรน (micellar enhanced ultrafiltration, MEUF) และการเติมโพลิเมอร์ในกระบวนการเมมเบรน (polymer enhanced ultrafiltration, PEUF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างให้สูงขึ้น

- Micellar enhanced ultrafiltration ใช้หลักการเพิ่มขนาดให้กับไอออนของโลหะ ด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว ให้จับตัวกันจนเกิดเป็นไมเซลล์ (micelle) และรวมตัวกับไอออนโลหะ ขนาดไอออนโลหะจึงใหญ่ขึ้นจนทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS), Linear alkylbenzene sulfonate (LAS) และ Sodium lauryl ether sulfate เป็นต้น

- Polymer enhanced ultrafiltration มีความสามารถในการกำจัดโลหะได้หลากหลายชนิด โดยโพลิเมอร์ที่เติมลงไปจะละลายน้ำ แล้วจับตัวรวมกับไอออนโลหะหนักเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของสารละลายที่เมมเบรนยอมให้ไหลผ่าน การศึกษาโดยส่วนใหญ่เป็นการหาชนิดของโพลิเมอร์ที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะหนัก โดยสารจับโลหะ (complexing agents) ที่ใช้ ได้แก่ Polyethyleneimine (PEI), Carboxy methylcellulose และ Poly ammonium acrylate เป็นต้น

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะด้วย MEUF และ PEUF ขึ้นอยู่กับการใช้สารลดแรงตึงผิวหรือโพลีเมอร์ที่เหมาะสมกับโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบในการผลิต จะมีโลหะหนักปนเปื้อนมากับน้ำเสียอยู่หลากหลายชนิด ทำให้การเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวหรือโพลีเมอร์ที่เหมาะสมมีความยุ่งยาก หรืออาจต้องใช้หลายชนิดตามชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อน หากเป็นแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ที่มีการปนเปื้อนไอออนอยู่หลายประเภท ก็จำเป็นต้องเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวให้เหมาะสมเช่นกัน

#### 2.8.3.4 การใช้แป้งกำจัดโลหะร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

แป้งโมดิฟายด์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 3-50 um (บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด) ซึ่งระบบอัลตราฟิลเตรชันมีความสามารถในการแยกสารโมเลกุลใหญ่ออกจากน้ำ โดยมีขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองประมาณ 0.1-0.001 um (Klodzinska, 2015) ดังนั้น แป้งโมดิฟายด์จะมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านหรือผ่านเมมเบรนในระดับอัลตราฟิลเตรชันได้น้อย อีกทั้งในปัจจุบันมีหลากหลายงานวิจัยที่ใช้แป้งในการดูดซับไอออนโลหะหนักร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Chang et al., 2007; Kim and Lim, 1999) โดยพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนได้มากถึง 80% ดังแสดงในตารางที่ 2.17 โดยมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ เช่น (polyaluminium chloride) PACI และสารส้ม เป็นต้น เพื่อทำลายเสถียรภาพของสารคอลลอยด์และแขวนลอยในน้ำ จากนั้นเติมพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกโมเลกุลของแป้งออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น เช่น polyethyleneimine (PEI), polyacrylic acid (PAA) และ polyacrylic acid sodium salt (PAASS) โดยโพลีเมอร์ที่เติมลงไปจะละลายน้ำ แล้วจับตัวรวมกับไอออนโลหะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ ทำให้แป้งเกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น และสามารถแยกแป้งออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น ก่อให้เกิดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรนน้อยลง ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอัลตราฟิลเตรชันได้ดียิ่งขึ้น และแป้งโมดิฟายด์หาได้ง่ายตามท้องตลาด เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายน้อย การเดินระบบไม่ซับซ้อน และเป็นการเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์

หลายงานวิจัย พบว่า การใช้แป้งโมดิฟายด์ในการกำจัดไอออนร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน ยังพบปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น การเพิ่มค่าเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนเพิ่มมากขึ้น แต่จะมีผลทำให้ปริมาณแป้งโมดิฟายด์ที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นด้วย (Bade et al., 2008) แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มเพอมีเอทฟลักซ์เริ่มต้นเป็นการเพิ่มแรงดันน้ำหน้าผิวเมมเบรน ส่งผลให้มลพิษถูกอัดเข้าไปในผิวเมมเบรนซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก เมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้มลพิษนั้นหลุดผ่านเยื่อกรองเมมเบรนออกไปปนกับน้ำส่วนเพอมีเอทได้ (Racho and Phalathip, 2014) ในการศึกษาของ Bade et al. (2008) พบว่า

การลดลงของค่าฟลักซ์อย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยการใช้แป้งแคทไอออนิกในการกำจัดโลหะหนัก ขนาดรูพรุนเมมเบรน 100,000 Da มีความเหมาะสมมากกว่าการใช้เฉพาะไมเซลส์ร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจาก แป้งแคทไอออนิกมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าไมเซลส์ จึงไม่ผ่านสามารถผ่านรูเมมเบรนออกไปได้ ดังนั้น ขนาดของตัวดูดซับ ก็มีความจำเป็นที่จะใช้พิจารณาในการดูดซับของเมมเบรน ในกระบวนการกรองเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของมวลแป้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ ทำให้เป็นการเพิ่มการดูดซับที่ผิวหน้าของเมมเบรน (Racho and Phalathip, 2014) และคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันจะเกิดเพิ่มขึ้น เมื่อค่าฟลักซ์ลดลง ค่ามวลต่อโมล ความหนืดของการไหลเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Demessie, 2002)

### 2.8.3.5 สถานะในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ในปัจจุบัน มีการนำเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารแขวนลอย (Cicek et al., 1998) ซึ่งระบบอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารเหล่านี้มากกว่า 90% ดังตารางที่ 2.18 ทั้งนี้ จำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณภาพของน้ำดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนได้ (Crozes et al., 1993) รวมถึงพารามิเตอร์อื่นๆในการเดินระบบ เช่น ฟลักซ์ ความถี่ในการล้างย้อน แะความดัน เป็นต้น (Bourgous et al., 2000) หากสถานะในการเดินระบบไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าและรูพรุนของเมมเบรน เช่น การเกิดฟาวลิง และการเกิดคอนเซนเตรชัน โพลาริไลต์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดลง จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของเมมเบรนในการเดินระบบ ดังตารางที่ 2.19 โดยในแต่ละสถานะที่เหมาะสมนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงชนิดของสารที่กำจัด และคุณสมบัติของเมมเบรนร่วมด้วย

ตารางที่ 2.17 การใช้แป้งในการกำจัดไอออนโลหะหนักร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ชนิดแป้ง	ไอออนที่กำจัด	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	Ultrafiltration			พีเอช	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)	อ้างอิง
			MWCO (Da)	ความดัน (bar)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> )			
Cationic starch	Cr (VI)	0.5 mM	100,000	2	0.0045	7	95	Baek et al., 2007
Crosslink Carboxymethyl corn starch	Pb (II)	99	50,000	-	-	5	99	Wang et al., 2011
	Cu (II)	30					90	
	Cd (II)	60					83	
	Zn (II)	30					77	
	Ni (II)	30					52	
Unmodified starch ร่วมกับ Polyethylene glycol	Zn (II)	10	10,000	1.5	-	7	90	Nik-Sulaiman et al., 2012
	Pb (II)						80	
	Cr (III)						85	
	Cr (VI)						90	
Cationic starch	Cr (VI)	30	100,000	2	4.6	5	94	Racho and Phalathip, 2014
Unmodified starch ร่วมกับ Polyethyleneimine	Zn (II)	10	10,000	1.5	0.0026	7	96	Baharuddin et al., 2015
	Pb(II)						87	

### 2.8.3.6 การทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรน

เมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดค่าฟลักซ์ที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการที่เยื่อกรองเมมเบรนเกิดการอุดตัน (Fouling) ทั้งบนผิวหน้าเยื่อกรองและภายในรูพรุนของเยื่อกรอง จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรน เพื่อให้เยื่อกรองมีสภาพที่ใกล้เคียงกับเยื่อกรองใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วยวิธีที่เหมาะสม โดยการทำทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรนนั้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก คือ (1) วิธีทางกายภาพ (Physical Method) เป็นการทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน เช่น การเพิ่มอัตราการไหล การดูดซับสะสมออกจากหน้าผิวด้วยฟองน้ำ การล้างกลับ (Back Washing) เป็นต้น (2) วิธีทางเคมี (Chemical Method) เป็นการใช้สารเคมีทำความสะอาดเยื่อกรอง เช่น กรด ค่าง เอ็มไซม์ เป็นต้น (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วิธีทางกายภาพ ใช้หลักการในการล้างกลับทางหรือล้างย้อน (Backwash) เพื่อให้สารที่อยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรองเมมเบรนหลุดออกไป เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อกรอง แต่จะลดการสะสมและการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น แต่ไม่สามารถกำจัดสารที่สะสมอยู่ในเยื่อกรองเมมเบรนได้หมด จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีต่อไป

2. วิธีทางเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (Desorption) หรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยากับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กรด ค่าง เอ็มไซม์ สารลดแรงตึงผิว สารฆ่าเชื้อ เป็นต้น การจะเลือกสารเคมีใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อกรองเมมเบรนว่ามีความสามารถในการคงทนต่อสารเคมีนั้นได้มากน้อยเพียงใด และสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดควรมีความเหมาะสมกับชนิดของสารที่อุดตันเมมเบรน ดังตารางที่ 2.20



ตารางที่ 2.18 การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่นในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน

Removal	Feed	Permeate	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)	ขนาดรูพรุน (um)	MWCO (Da)	รูปแบบการไหล	ชนิดเยื่อกรอง	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> )	Flux เริ่มต้น (L/m <sup>2</sup> .h)	Back wash (min)	อ้างอิง
ความขุ่น (NTU)	14-80	0.7-4	95	0.05	-	dead-end	PAN	45	-	-	Fan et al. (2016)
ความขุ่น (NTU)	110	0.15	99.8	-	-	crossflow	PVDF	0.073	120	1	Ravazzini et al. (2005)
TSS (mg/L)	63	-	100								
COD (mg/L)	218	138	36.7								
ความขุ่น (NTU)	2.05	0.07	96.6	0.03	-	crossflow	PVDF	0.025	20	1	Yu and Graham, (2015)
TSS (mg/L)	47.2	-	100								
Al (mg/L)	0.083	0.072	13.2								
Zn (II) (mg/L)	10	3.4	66	-	10,000	crossflow	polysulfone	0.0026	-	-	Baharuddin and Sulaiman, (2014)
Pb(II) (mg/L)	10	0.4	96								

ตารางที่ 2.18 การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่นในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน (ต่อ)

Removal	Feed	Permeate	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)	ขนาดรูพรุน (um)	MWCO (Da)	รูปแบบการไหล	ชนิดเยื่อกรอง	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> )	Flux เริ่มต้น (L/m <sup>2</sup> .h)	Backwash (min)	อ้างอิง
ความขุ่น (NTU)	240	0.96	99.6	0.1	-	crossflow	stainless steel	-	-	-	Bergamasco et al. (2011)
COD (mg/L)	19.3	2.56	86.7								
TSS (mg/L)	1332	39.96	97								
TDS (mg/L)	228	63.84	72								
COD (mg/L)	71.28	33.44	73	-	100,000	crossflow	polyethersulfone	0.1	130	-	Yap et al. (2013)
TSS (mg/L)	68	13	90								
ความขุ่น (NTU)	81	4.83	96								
COD (mg/L)	235	5.6	97.6	0.1	-	crossflow	polyamide	0.5	20	-	Jadhao and Dawande, (2012)
TSS (mg/L)	365	0.55	99.8								
TDS (mg/L)	575	1.73	99.7								

ตารางที่ 2.19 สภาวะในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น

เยื่อกรอง	รูปแบบการไหล	MWCO (kDa)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> )	TMP (kPa)	Flux (L/m <sup>2</sup> .h)	Flow rate (L/h)	ระยะเวลาเดินระบบ (day)	การทำความสะอาด	อ้างอิง
Polyvinylamine	Cross flow	10	0.00145	0.2	170-190	0.25	6	- DI water and HCl	Huang et al. (2015)
PES	Cross flow	-	0.556	0.8	200-210	111-117	0.25	-	Kinieczny et al. (2009)
PES	Dead end	150	45	0.05	70	3150	2	- DI water	Neubrand et al. (2010)
Polysulfone	Cross flow	100	7.9	21-72	108-180	853-1422	-	- DI water, Chlorine and Citric acid	Bourgeois et al. (2001)
Polysulfone	Cross flow	-	50	-	140	7000	1	- DI water, NaClO, NaOH and HCl	Falsanisi et al. (2009)

ตารางที่ 2.20 สารเคมีที่ใช้ที่การทำความสะอาดสารที่อุดคั่นเมมเบรน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

สารทำความสะอาด	ตะกรันเกลือ ออกไซด์ของโลหะ	คอลลอยด์/ อนุภาค	จุลินทรีย์
กรดเกลือเข้มข้น	√	-	-
กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	√	-	-
กรดฟอสฟอริกเข้มข้น	√	-	-
โซเดียมไฮดรอกไซด์	-	√	√
ไตรโซเดียมฟอสเฟต ผสมกับเกลือโซเดียมไฮดรอกไซด์ของอิตีทีเอเข้มข้นและโซเดียมไฮดรอกไซด์	-	√	√
โซเดียมไฮโครซัลไฟท์	√	-	-
กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ผสมแอมโมเนียมไบฟลูออไรด์	√	√	-

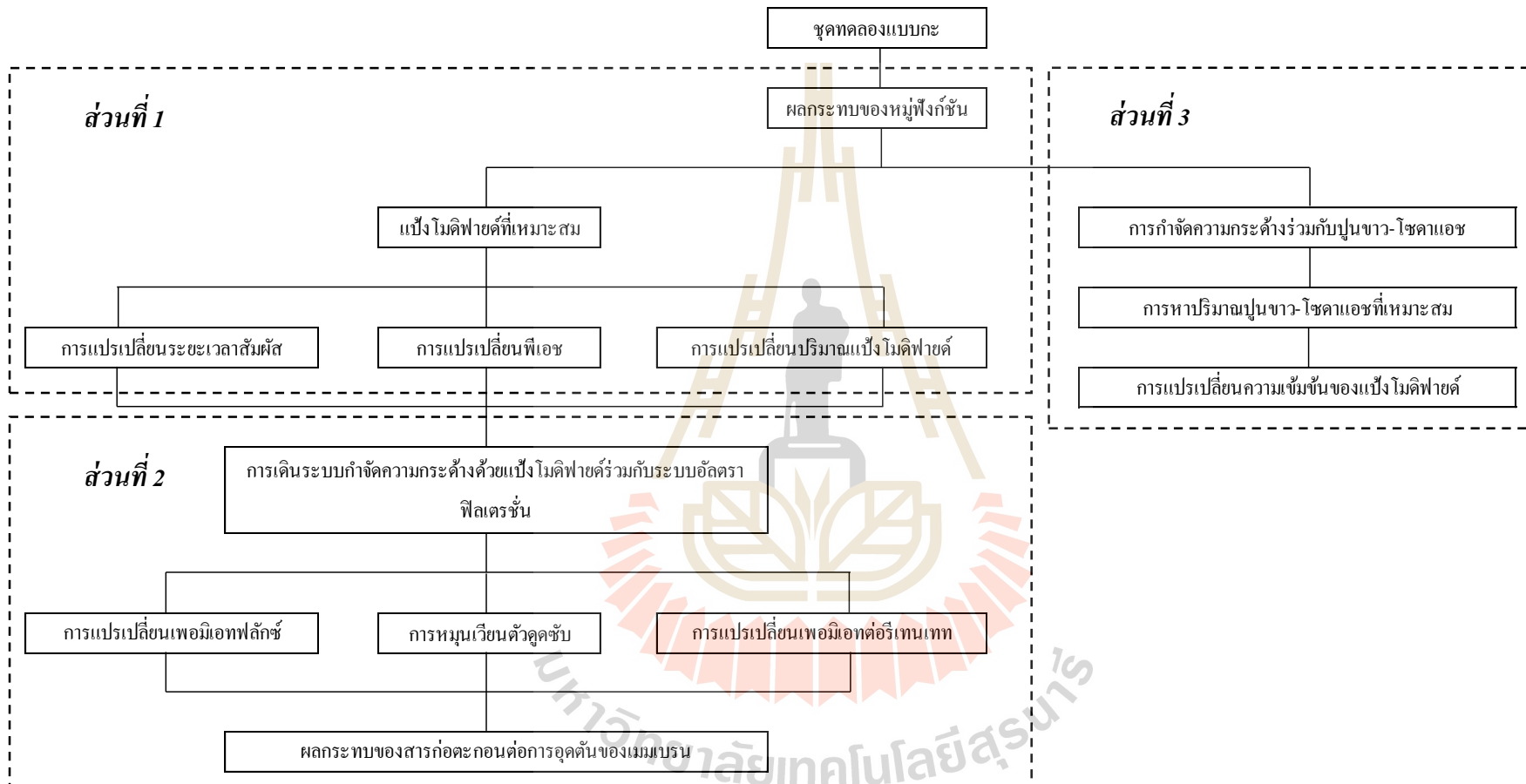
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยนำแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยกระบวนการทางพันธุวิศวกรรม (Chemical modified) ได้แก่ แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต (Sodium octenylsuccinate) แป้งอะซิทธิเลทออกซิไดซ์ (Acetylate oxidize) และแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ (Phosphate monoester) เพื่อกำจัดความกระด้างในน้ำประปร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยการศึกษาประกอบด้วย (1) การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการจัดน้ำกระด้างด้วยชุดทดลองแบบกะ (Batch Experiments) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำกระด้าง โดยทำการศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันของแป้ง โมดิฟายด์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุด และเลือกชนิดของแป้งที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดเพื่อใช้ในการศึกษาถัดไป การศึกษาผลกระทบของค่าพีเอช ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส ผลกระทบความเข้มข้นของแป้ง โมดิฟายด์ (2) การศึกษาการเดินระบบกำจัดค่าความกระด้างร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการเดินระบบ โดยทำการศึกษาความต้านทานเริ่มต้นของเยื่อกรองเมมเบรน การศึกษาผลของการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทพลักซ์ การศึกษาแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทนท ผลของการหมุนเวียนวัสดุดูดซับกลับมาใช้ในระบบ และผลของสารก่อตะกอนต่อการอุดตันของเยื่อกรองเมมเบรน และ (3) การศึกษาผลกระทบของการกำจัดความกระด้างด้วยแป้ง โมดิฟายด์ร่วมกับกระบวนการปูนขาว-โซดาแอช โดยมีขั้นตอนการศึกษา ดังรูปที่ 3.1

#### 3.1 น้ำตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ เก็บตัวอย่างน้ำประปาจากอาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยแบ่งเก็บตัวอย่างน้ำประปา 2 ช่วง ได้แก่ (1) การศึกษาพารามิเตอร์ขั้นต้นที่มีผลกระทบต่อการจัดน้ำกระด้าง จำนวน 100 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อการจัดความกระด้างด้วยแป้ง โมดิฟายด์ และกลไกในการเกิดปฏิกิริยา และทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้น ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) ของแข็งละลายน้ำ (TDS) ความขุ่น (Turbidity) พีเอช (pH) และซีโอดี (COD) และ (2) การศึกษาการ



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

เดินระบบการกำจัดน้ำกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำประปาจากท่อน้ำประปาห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยตรง และทำการทดลองเดินระบบต่อเนื่องจนกระทั่งเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% จึงทำการเดินระบบชุดการทดลองใหม่

### 3.2 วัสดุดูดซับ

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ด้วยแป้งโมดิฟายด์จากกระบวนการตัดแปรทางเคมี (chemical modified) โดยใช้แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต (Sodium octenylsuccinate) แป้งอะซิทิเลทออกซิไดซ์ (Acetylate oxidize) และแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ (Phosphate monoester) จากบริษัท สวงวนษ์อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นแป้งประจุลบทั้งสามชนิด มีค่าร้อยละระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) เท่ากับ 0.02 0.05 และ 0.08 ตามลำดับ ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.1 โดยคุณสมบัติของแป้งหลังการตัดแปรจะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น และพบว่าค่าระดับการแทนที่ของแป้งที่สูงขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย (Sitohy and Ramadan, 2001) และด้วยคุณสมบัติของแป้งประจุลบ จึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะประจุสองบวกในน้ำได้ดี (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้แป้งโมดิฟายด์เป็นตัวดูดซับความกระด้างในน้ำประปา เนื่องจากมีราคาถูก หาง่ายในประเทศไทย มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง และเป็นสารอินทรีย์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ไม่เป็นภาระบำบัดในพื้นที่ฝังกลบ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แป้งโมดิฟายด์เป็นวัสดุดูดซับ ยังมีข้อจำกัดคือ แป้งมีขนาดอนุภาคที่เล็ก ทำให้แยกออกจากน้ำได้ยาก ต้องอาศัยระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ระบบเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแป้งโมดิฟายด์ออกจากน้ำ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแป้งโมดิฟายด์

ชนิดแป้ง	หมู่ฟังก์ชัน	DS (%)	ขนาด (um)
แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต	R- $C_{12}H_{18}O_3Na$	0.02	15
แป้งอะซิทิเลทออกซิไดซ์	R-COCH <sub>3</sub>	0.05	50-500
แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์	P=O(OH) <sub>2</sub>	0.08	3-50

### 3.3 ชุดทดลองแบบกะ

การทดลองขั้นต้นในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา โดยเลือกชนิดของแบ็งจากการศึกษาที่ 3.3 ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาได้เหมาะสมที่สุด โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ความกระด้างทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ ความขุ่น และซีโอดี เป็นต้น โดยเก็บตัวอย่างน้ำประปา ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง  $25.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 3.3

### 3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแบ็งโมดิฟายด์

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแบ็ง โมดิฟายด์ในน้ำประปา ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การกำจัดน้ำกระด้างด้วยชุดทดลองแบบกะ (Batch Reactors) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำกระด้าง โดยทำการศึกษา (1) ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชัน (2) ผลกระทบของค่าพีเอช (3) ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส (4) ผลกระทบความเข้มข้นของแบ็ง โมดิฟายด์ (5) แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (6) แบบจำลองสมดุลการดูดซับ โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

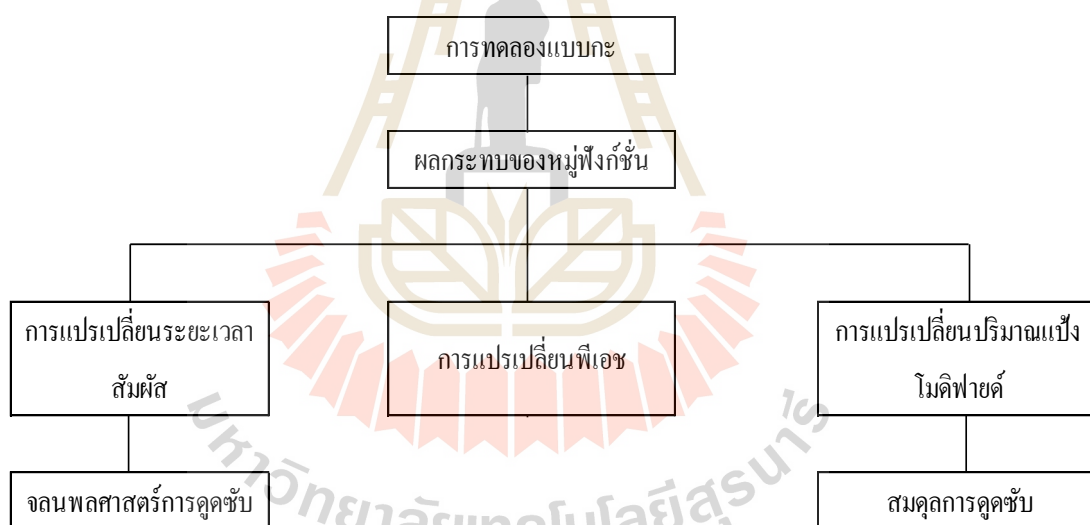
#### 3.4.1 การศึกษาผลกระทบหมู่ฟังก์ชันของแบ็งโมดิฟายด์

ในการศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชัน ประกอบไปด้วยแบ็ง โมดิฟายด์ 3 ชนิด ได้แก่ แบ็งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต (Sodium octenylsuccinate) แบ็งอะซิทิเลทออกซิไดซ์ (Acetylate oxidize) และแบ็งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ (Phosphate monoester) เปรียบเทียบกับแบ็งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร (non-modified) โดยใช้ปริมาณแบ็ง 1.0 กรัม ต่อน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 150 rpm (Chen and Wang, 2006) ดังรายละเอียดตารางที่ 3.2



ตารางที่ 3.2 การศึกษาผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันของแป้งโมดิฟายด์

ชนิดของแป้ง	ปริมาณแป้ง (กรัม)	ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำ ตัวอย่าง (ml)
แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต	1.0	24	200
แป้งอะซิทธิเลทออกซิไคซ์	1.0	24	200
แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์	1.0	24	200
แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัด แปรรูป	1.0	24	200



รูปที่ 3.2 แผนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้าง



รูปที่ 3.3 ชุดการทดลองแบบกะ

### 3.4.2 การแปรเปลี่ยนพีเอช

ทำการศึกษาผลกระทบพีเอชของน้ำตัวอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง โดยทำการศึกษาที่พีเอช 5.5 และพีเอชน้ำธรรมชาติ ใช้ปริมาณโมดิฟายด์ 1.0 กรัม ต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร และแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในช่วง 5-300 นาที ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 150 rpm (Chen and Wang, 2006) ดังรายละเอียดตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับความกระด้าง

พีเอช	แป้งโมดิฟายด์ (กรัม)	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ปริมาณน้ำตัวอย่าง (ml)
5.5	1.0	5-300	200
พีเอชน้ำธรรมชาติ	1.0	5-300	200

### 3.4.3 การแปรผันระยะเวลาสัมผัส

ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง โดยใช้ปริมาณแป้งโมดิฟายด์ 1.0 กรัม ต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตรและแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสในช่วง 3-720 นาที ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 150 rpm (Chen and Wang, 2006) ดังรายละเอียดตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับความกระด้าง

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ปริมาณน้ำตัวอย่าง (ml)
1-29	3 , 5, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 20, 21, 24, 25, 27, 30, 33, 36, 39, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720	200

#### 3.4.4 การแปรผันปริมาณของแป้ง

จากการศึกษาในหัวข้อ 3.4.3 ทำให้ทราบถึงระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม จากนั้นทำการศึกษาปริมาณของแป้ง โมดิฟายด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้าง โดยแปรเปลี่ยนปริมาณของแป้ง โมดิฟายด์ในช่วง 1.0-5.0 กรัม ต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 150 rpm (Rolence et al., 2014) ดังรายละเอียดตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การศึกษาปริมาณของแป้ง โมดิฟายด์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง

ชุดการทดลอง	ปริมาณของแป้ง (g)	ปริมาณน้ำตัวอย่าง (ml)
1	1.0	200
2	1.5	200
3	2.0	200
4	2.5	200
5	3.0	200
6	3.5	200
7	4.0	200
8	4.5	200
9	5.0	200

### 3.4.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic modeling) ของการดูดซับของแข็ง โมดิไฟด์ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลระหว่างสารที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ โดยทำการศึกษาในแบบจำลอง 2 แบบ คือ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo first order) ดังสมการ (3.1) และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (Pseudo second order) ดังสมการ (3.2) โดยแบบจำลองทั้งสองแบบตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาเทียม (Pseudo chemical reaction) ซึ่งดำเนินการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม ตามการศึกษาของ Dong et al. (2010) และ Cheng et al. (2009) ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

แบบจำลองสมการอันดับหนึ่งเทียม ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุดูดซับกับ โมเลกุลของสารถูกดูดซับ โดยอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกรอบครอง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (3.1)$$

เมื่อ  $q_t$  หมายถึง ความสามารถในการดูดซับความกระด้าง ณ เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $q_e$  หมายถึง ความสามารถในการดูดซับความกระด้าง ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $k_1$  หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (นาที<sup>-1</sup>) และ  
 $t$  หมายถึง เวลาใดๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

แบบจำลองสมการอันดับสองเทียม ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.2)$$

โดยที่ค่า  $k_2$  หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัม/มิลลิกรัม-นาที)

### 3.4.6 แบบจำลองสมมูลการดูดซับ

การศึกษาสมมูลการดูดซับหรือ “ไอโซเทอร์มการดูดซับ” โดยแบบจำลองสมมูลการดูดซับสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการดูดซับและคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับความกระด้างของแข็งโมดิฟายด์ ในการศึกษาทำการทดสอบสมมูลการดูดซับความกระด้างของน้ำโดยใช้แข็งโมดิฟายด์ด้วยแบบจำลอง 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Model) โดยเขียนกราฟระหว่างค่า  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  ดังสมการ (3.3) แบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich Model) เขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ดังสมการ (3.4) และแบบจำลองการดูดซับของเทมกิน (Temkin Isotherm) โดยเขียนกราฟระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C_e$  ดังสมการที่ (3.5) โดยมีรายละเอียดดังนี้

แบบจำลองของแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือ โมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ โดยพลังงานในการดูดซับจะเท่ากันทุกจุดของบริเวณที่เกิดการดูดซับ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งจะมีการดูดซับทางเคมีเป็นส่วนใหญ่ (Evanglou, 1998) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \frac{1}{C_e} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $q_e$  หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_m$  หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $K_L$  หมายถึง ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)  
 $C_e$  หมายถึง ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

แบบจำลองฟรุนดลิช ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยึดจับกันเป็นชั้น (multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surface) พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด (Cheng et al., 2009) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_L \quad (3.4)$$

เมื่อ  $K_L$  หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $n$  หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

### 3.5 การศึกษาการกำจัดความกระด้างร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

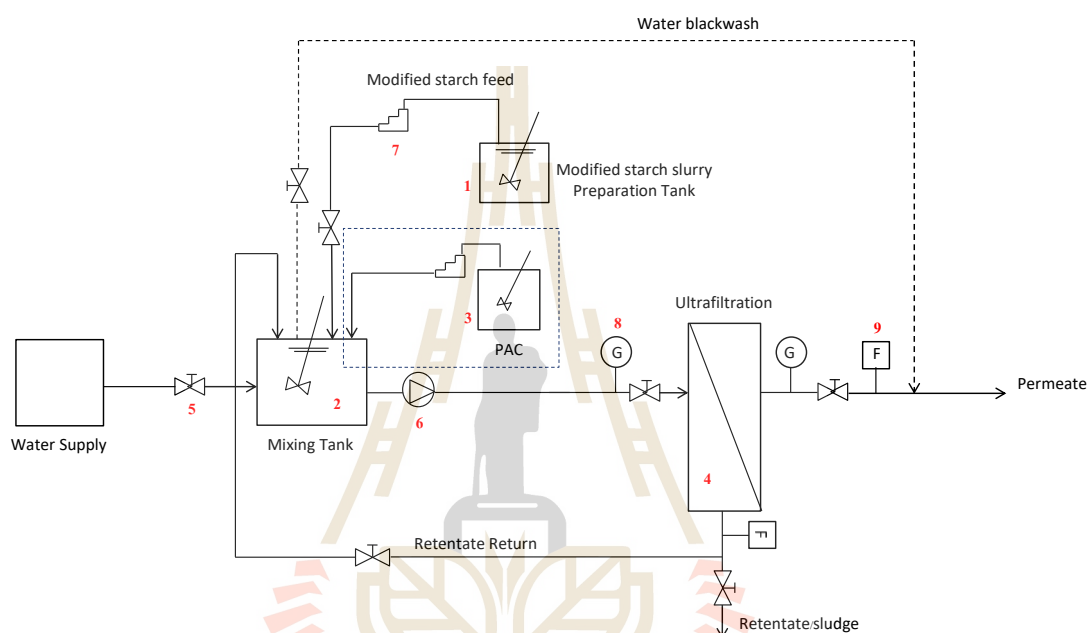
ทำการเดินระบบการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาด้วยเบี่ยง โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง โดยทำการเดินระบบจนกระทั่งค่าเพอมีอเทฟลักซ์ลดลง 60% จึงล้างทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด หลังจากนั้นจึงทำการเดินระบบต่อเนื่องจนครบระยะเวลา 4 ชั่วโมง จึงทำการเดินระบบชุดการทดลองใหม่ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองเมมเบรนในการเดินระบบร่วมกับเบี่ยง โมดิฟายด์ โดยเยื่อกรองเมมเบรนมีขนาดรูพรุน 0.01  $\mu\text{m}$  และเบี่ยง โมดิฟายด์ มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 3-50  $\mu\text{m}$  (บริษัท สวงวนวงศ์อุตสาหกรรม จำกัด) ดังนั้นการเลือกใช้เมมเบรนชนิดนี้ จะมีแนวโน้มในการแยกเบี่ยง โมดิฟายด์ออกจากน้ำได้ และทำการศึกษารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพต่อการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ (1) การแปรผันเพอมีอเทฟลักซ์ (2) การแปรผันสัดส่วนเพอมีอเทต่อรีเทนเทท (3) ผลกระทบของการหมุนเวียนวัสดุชุดขับกลับมาใช้งาน (4) ผลของสารก่อตะกอนต่อการอุดตันของเยื่อกรองเมมเบรน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.5.1 ชุดการทดลอง

ทำการติดตั้งชุดทดลองการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาพร้อมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เยื่อกรองเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากวัสดุประเภทพอลิเอทรีเลนไครด์ (PAN) มีพื้นที่ผิวเมมเบรน เท่ากับ 4.6 ตารางเมตร โดยสามารถกักกันโมเลกุลของสารที่ขนาดใหญ่มากกว่า 10,000 ดาร์ตัน ซึ่งคุณสมบัติเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 3.6 และมีรายละเอียดอุปกรณ์ในชุดทดลอง ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วย

- (1) ถังเตรียมสารละลายน้ำเบี่ยง โมดิฟายด์
- (2) ถังกวนผสม
- (3) ถังเตรียมสารละลายโพลีสตูมินัมคลอไรด์
- (4) เยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ทำหน้าที่ แยกอนุภาคขนาดใหญ่และเบี่ยง โมดิฟายด์ออกจากน้ำ
- (5) วาล์ว ทำหน้าที่ ปรับปริมาณอัตราการไหลของน้ำที่เข้า-ออกระบบ
- (6) บั๊มหอยโข่ง ทำหน้าที่ เป็นต้นกำลังในการส่งถ่ายน้ำจากถังกวนผสมไปยังเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

- (7) บั้มไดอะแฟลม ทำหน้าที่ เป็นต้นกำลังในการส่งน้ำจากต้นทางไปยังถังกวนผสม
- (8) เกจวัดความดัน ทำหน้าที่ วัดความดันเข้า-ออกระบบเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน
- (9) เครื่องวัดอัตราการไหล ทำหน้าที่ วัดอัตราการไหลน้ำเพอมีเอทและรีเทนเทท



รูปที่ 3.4 ชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการ ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง (Ultra-Flo Pte Ltd.)

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) (คาร์ตัน)	100,000
ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งาน	3-9
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	< 50 °C
Product turbidity	< 0.1 NTU
อัตราการไหล (@ 1 bar)	± 1.4 m <sup>3</sup> /h (City water)

### 3.6 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับแป้งโมดิฟายด์

ทำการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยศึกษาการแปรเปลี่ยนสถานะการเดินระบบ ได้แก่ การแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท การหมุนเวียนวัสดุคูชับกลับมาใช้งาน และการศึกษาผลของสารก่อตะกอนต่อการอุดตันของเมมเบรน เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดความกระด้าง และเพื่อยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนให้เหมาะสมในการแยกแป้งโมดิฟายด์ออกจากน้ำ

#### 3.6.1 ผลของการแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์

ในการศึกษาการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ร่วมกับแป้งโมดิฟายด์ โดยการ



แปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 20 25 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr โดยใช้อัตราส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 50:50 (Mozia and Tomaszewska, 2004) ดังรายละเอียดตารางที่ 3.7

**ตารางที่ 3.7 การแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์**

สารป้อนเข้า	น้ำประปา		
เพอมีเอทฟลักซ์ (L/m <sup>2</sup> .hr)	20	25	30
อัตราการไหล (L/min)	3.06	3.84	4.60
ระยะเวลาเดินระบบ	จนกว่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60%		

### 3.6.2 ผลของการแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท

จากการศึกษาการแปรผันค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมต่อการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน นำเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมมาแปรผันสัดส่วนน้ำเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 25:50 และ 75:25 ดังแสดงในตารางที่ 3.8

**ตารางที่ 3.8 การแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท**

สารป้อนเข้า	ระยะเวลาเดินระบบ	สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท
น้ำประปา	จนกว่าเพอมีเอทฟลักซ์ ลดลง 60%	25 : 75
		50 : 50
		75 : 25

### 3.6.3 ผลกระทบการหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับมาใช้ในระบบ

จากการศึกษาในหัวข้อ 3.6.1 และ 3.6.2 นำค่าเพอมีเอทฟลักซ์และสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททที่เหมาะสม ทำการศึกษาการเดินระบบการหมุนเวียนวัสดุคูดซับแบริ่งโมดิไฟด์ ในอัตราส่วน 20% 30% และ 50% ของน้ำรีเทนเททกลับมาใช้ในระบบ เพื่อศึกษาความสามารถในการคูดซับความกระด้างของแบริ่งโมดิไฟด์ และเปรียบเทียบกับ การเดินระบบ โดยไม่มีการหมุนเวียนวัสดุคูดซับ ซึ่งการหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับมาใช้งานในระบบ เป็นการลดต้นทุนในการซื้อวัสดุคูดซับ และเป็นการใช้งานวัสดุคูดซับให้เกิดประโยชน์สูงสุด

### 3.6.4 ผลของสารก่อตะกอนต่อการอุดฟันของเมมเบรน

สารก่อตะกอนที่เลือกใช้ คือ โพลีลูมินัมคลอไรด์ (PACl) ที่ความเข้มข้น เท่ากับ 20 ppm (Yun, 2012) โดยจะทำการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ค่าฟลักซ์ลดลงในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีการเติมโพลีลูมินัมคลอไรด์ และ ไม่มีการเติมโพลีลูมินัมคลอไรด์ ทำการเดินระบบจนกว่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% ซึ่งค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ลดลงแสดงถึงการอุดฟันของเมมเบรนที่เกิดขึ้น โดยในการศึกษาของ Yun (2012) พบว่า การใช้ปริมาณ PACl ที่ 20 ppm ก่อให้เกิดการอุดฟันเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันน้อยกว่าการใช้ปริมาณ PACl ที่ 8 ppm

### 3.6.5 การล้างทำความสะอาดเมมเบรน

การอุดฟันเยื่อกรองเมมเบรน เกิดจากสารสะสมของสารหรืออนุภาคที่ผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรน ซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง จึงจำเป็นต้องมีการทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรน สำหรับวิธีทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรนในการศึกษาครั้งนี้ คือ (1) หลังจากทำการเดินระบบจนค่าเพอมีเอทลดลง 60% ทำการล้างทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อล้างอนุภาคของแข็งและอนุภาคต่างๆ ที่สะสมอยู่บนผิวหน้าเมมเบรนออก หลังจากนั้น (2) ทำการล้างย้อน (back wash) เพื่อกำจัดชั้นเค้กหรืออนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อกรองอีกครั้ง ทำได้โดยการป้อนน้ำสะอาดเข้าทางด้านตรงข้ามกับน้ำเพอมีเอท ซึ่งจะทำให้น้ำสามารถดันสิ่งอุดฟันออกมาจากเยื่อกรองได้ โดยทำการล้างย้อนเป็นเวลา 2 นาที (Bourgeois et al., 2001)

## 3.7 ผลกระทบการกำจัดความกระด้างร่วมกับปูนขาว-โซดาแอส

จากการศึกษาในหัวข้อ 3.4.3 และ 3.4.4 ทำให้ทราบถึงระยะเวลาสัมผัส และปริมาณแข็งโมดิฟายด์ที่เหมาะสม จากนั้นทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาพร้อมกับกระบวนการปูนขาว-โซดาแอส เพื่อหาปริมาณของปูนขาว โซดาแอสที่เหมาะสมในการกำจัดความกระด้าง โดยทำการศึกษาสองส่วนได้แก่ (1) การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของปูนขาว-โซดาแอส และ (2) การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของแข็งโมดิฟายด์ ด้วยชุดทดลองแบบกะ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีรายละเอียดการศึกษา ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 ชุดทดลองแบบกะในการหาปริมาณปูนขาว โซดาแอชที่เหมาะสม

### 3.7.1 การหาปริมาณปูนขาว-โซดาแอชที่เหมาะสม

ศึกษาการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของปูนขาวในช่วง 60-200 ppm ร่วมกับโซดาแอช 40 ppm โดยวิธีการทดลอง Jar test หลังจากนั้นนำน้ำตัวอย่างส่วนใสปริมาณ 200 มิลลิลิตร ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้าง ที่สภาวะควบคุม ใช้แป้งโมดิไฟด์ 2.0 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 rpm ดังรายละเอียดตารางที่ 3.9 ตารางที่ 3.9 การศึกษาความเข้มข้นของปูนขาวที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของปูนขาว (ppm)	ความเข้มข้นของโซดาแอช (ppm)
1	60	40
2	70	40
3	80	40
4	90	40
5	100	40
6	200	40

### 3.7.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของแบริ่งโมดิฟายด์ในกระบวนการป้อนขาว-โซดาแอส

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.7.1 จะทำให้ทราบถึงความเข้มข้นของป้อนขาว-โซดาแอสที่เหมาะสมในการลดค่าความกระด้าง จากนั้นนำมาทำการศึกษากการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของแบริ่งโมดิฟายด์ โดยใช้ความเข้มข้นของแบริ่ง โมดิฟายด์ในช่วง 10-50 g/L ที่สภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง ดังรายละเอียดตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 การศึกษาปริมาณของแบริ่ง โมดิฟายด์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของป้อนขาว (ppm)	ความเข้มข้นของโซดาแอส (ppm)	ความเข้มข้นของแบริ่งโมดิฟายด์ (g/L)
1	จากการศึกษา 3.7.1	40	10
2		40	20
3		40	30
4		40	40
5		40	50

### 3.8 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ (1) ชุดทดลองแบบกะ (Batch experiments) ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำตัวอย่าง ดังนี้ ค่าสภาพด่าง แคลเซียม แมกนีเซียม ฟิเอช ของแข็งละลาย ความขุ่น ความกระด้างทั้งหมด และซีโอดี เป็นต้น และ (2) การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แบริ่งโมดิฟายด์ในการกำจัดความกระด้าง ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าฟิเอช ของแข็งละลายน้ำ ความขุ่น ความกระด้างทั้งหมด และซีโอดี เป็นต้น โดยในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพอมีเอทมาวิเคราะห์ทุกๆ 15 นาที ซึ่งทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตาม Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2005) ซึ่งพารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.11 (Yu and Graham, 2015)

ตารางที่ 3.11 พารามิเตอร์และวิธีในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	การศึกษา
สภาพค่าง	Indicator Method	ชุดทดลองแบบกะ
แคลเซียม	EDTA titration	ชุดทดลองแบบกะ
แมกนีเซียม	EDTA titration	ชุดทดลองแบบกะ
พีเอช	pH Meter	ชุดทดลองแบบกะ และ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น
ของแข็งละลายน้ำ	TDS meter	ชุดทดลองแบบกะ และ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น
ความขุ่น	Turbidity meter	ชุดทดลองแบบกะ และ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น
ความกระด้างทั้งหมด	EDTA titration	ชุดทดลองแบบกะ และ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น
ซีโอดี	Closed reflux (Titration)	ชุดทดลองแบบกะ และ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชั่น

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การศึกษากำจัดความกระด้างในน้ำประปาโดยใช้แบริ่งโมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยศึกษาหุมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพและความสามารถในการกำจัดความกระด้าง และการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับและสมดุลการดูดซับ ซึ่งประกอบด้วย (1) การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อกำจัดน้ำกระด้างด้วยชุดทดลองแบบกะ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับค่าความกระด้างด้วยแบริ่งโมดิฟายด์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาและความเร็วการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดความกระด้าง (2) การศึกษากำจัดความกระด้างในน้ำประปาพร้อมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยการเดินระบบต่อเนื่อง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองเมมเบรนในการกำจัดความกระด้างร่วมกับการใช้แบริ่งโมดิฟายด์ และศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินระบบของระบบอัลตราฟิลเตรชัน และ (3) การศึกษาผลกระทบของกำจัดความกระด้างด้วยแบริ่งโมดิฟายด์ร่วมกับปูนขาว-โซดาแอช โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำดิบ

ในการศึกษานี้ นำน้ำประปาจาก อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของน้ำประปา ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 – เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 โดยพบว่า น้ำประปามีค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าพีเอช เท่ากับ 7.50 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติของพีเอชน้ำดิบจากธรรมชาติ ค่าความกระด้างทั้งหมด เท่ากับ 103.89 mg/L as CaCO<sub>3</sub> สภาพด่าง เท่ากับ 77.87 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ความเข้มข้นของแคลเซียม และแมกนีเซียมไอออน เท่ากับ 74.67 mg/L as CaCO<sub>3</sub> และ 30.67 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ตามลำดับ และค่าซีโอดี เท่ากับ 22.78 mg/L ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำประปาที่ทำการวิเคราะห์ มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการประปาส่วนภูมิภาค (WHO., 2011) สามารถนำไปใช้อุปโภค-บริโภคได้ แต่ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้อุตสาหกรรมน้ำอ่อนบางประเภท เช่น น้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ สามารถมีค่าความกระด้างได้ไม่เกิน 50 mg/L as CaCO<sub>3</sub> น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม สามารถมีค่าความกระด้างได้ไม่เกิน 20 mg/L as CaCO<sub>3</sub> และกระบวนการผลิตบางประเภทจำเป็นต้องควบคุมค่าความ

กระด้างให้มีค่าต่ำมากๆ เช่น น้ำที่ใช้ในหม้อต้มไอน้ำ จำเป็นต้องมีค่าความกระด้างต่ำกว่า 10 mg/L as CaCO<sub>3</sub> (Altret Performance Chemical Gujarat Pvt Ltd.) เนื่องจากความกระด้างจะส่งผลกระทบต่อระบบความร้อน เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำลดลง จึงจำเป็นที่จะต้องลดค่าความกระด้างให้ต่ำลง ให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมน้ำอ่อนบางประเภทต่อไป (Mustapha et al., 2016)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำประปา

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	S.D.
พีเอช	7.50	0.20
ความกระด้างทั้งหมด (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	103.89	5.11
สภาพด่าง (mg/L)	77.87	8.54
แคลเซียม (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	74.67	4.62
แมกนีเซียม (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	30.67	2.31
ความขุ่น (NTU)	0.36	0.15
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	219.47	52.96
ซีโอดี (mg/L)	22.78	17.71

## ส่วนที่ 1 : การศึกษาในชุดทดลองแบบกะ (Batch Experiments)

### 4.2 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันของแป้งโมดิฟายด์ในการกำจัดความกระด้าง

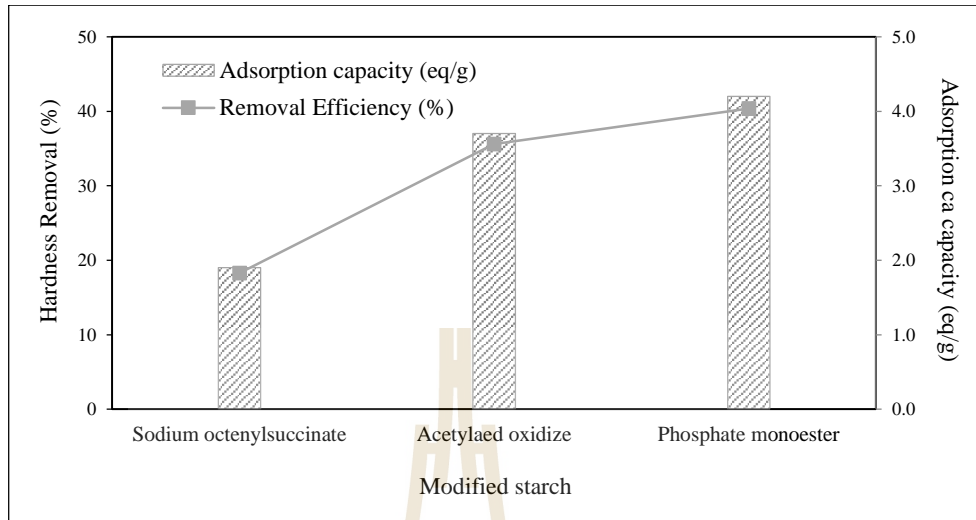
ทำการศึกษาศักยภาพในการกำจัดความกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ทั้งหมด 3 ชนิด เพื่อศึกษาชนิดของหมู่ฟังก์ชันของแป้งโมดิฟายด์ที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างในน้ำประปาได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเลือกแป้งโมดิฟายด์เพียงชนิดเดียวนำไปศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาด้วยชุดทดลองแบบกะ ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยแป้งโมดิฟายด์ทั้ง 3 ชนิดถูกดัดแปรด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical modification) ด้วยการแทนที่หมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งชนิดของแป้งโมดิฟายด์ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต (Sodium octenylsuccinate) มีหมู่ฟังก์ชันเป็นโซเดียมออกเทนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์ (R-C<sub>12</sub>H<sub>18</sub>O<sub>3</sub>Na) แป้งอะซิไทเลตออกซิไดซ์ (Acetylate oxidize) มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่อะซิไดล (R-COCH<sub>3</sub>) และแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ (Phosphate monoester) มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่ฟอสเฟต (P=O(OH)<sub>2</sub>) ผลการศึกษาพบว่า แป้งฟอสเฟต โมโนเอส

สเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา โดยลดค่าความกระด้างในน้ำประปาจาก 103.89 mg/L as CaCO<sub>3</sub> เหลือเท่ากับ 61.67 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับของแข็งเท่ากับ 4.23 eq/g ส่วนแข็งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต และแข็งอะซิทิเลทออกซิไดซ์ สามารถลดค่าความกระด้างเหลือ 85.00 mg/L as CaCO<sub>3</sub> และ 66.67 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ตามลำดับ โดยมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.90 และ 3.73 eq/g ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 ซึ่งแนวโน้มกลไกการกำจัดความกระด้างด้วยแข็งโมดิฟายด์ทั้งสามชนิด อาจเกิดกลไกทางกายภาพ โดยแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนสามารถจับบริเวณพื้นที่ผิวของแข็ง โมดิฟายด์ (Baharuddin et al., 2015) และมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการดูดซับทางเคมี โดยมีผลมาจากกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ 2 กลุ่ม คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งอะไมโลเพกตินเป็นโซ่ที่มีการแตกแขนงสูง (70-80%) ของพอลิแซ็กคาไรด์ (Hoover, 2001) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสูญเสียโครงสร้างเดิม โดยการเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะในตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิวของโมเลกุลแข็ง (Eilers, 1936; Chabot and Hood, 1976)

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแข็งโมดิฟายด์

ชนิดแข็ง โมดิฟายด์	ความกระด้างทั้งหมด (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Removal Efficiency (%)	Adsorption capacity (eq/g)
แข็งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต	85.00 ± 8.66	18.27	1.90
แข็งอะซิทิเลทออกซิไดซ์	66.67 ± 2.89	35.58	3.73
แข็งฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์	61.67 ± 7.64	40.38	4.23





รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับความกระด้างทั้งหมดของแป้งโมดิฟายด์

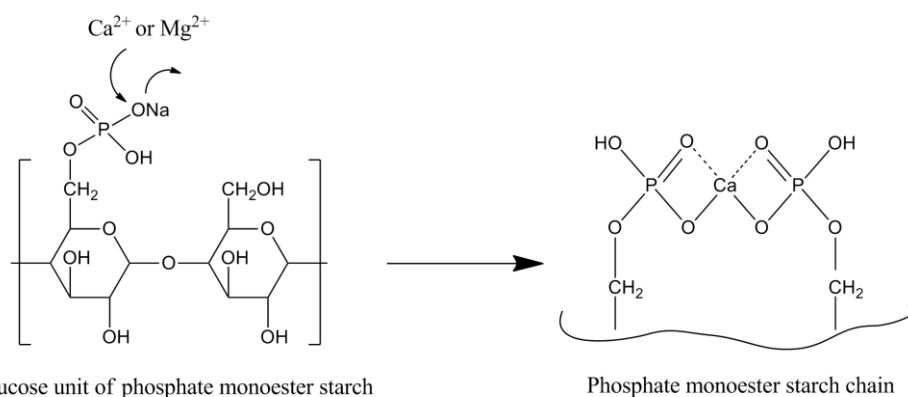
แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นแป้งประจุลบ คัดแปรด้วยกระบวนการทางเคมี โดยการแทนที่หมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตเข้าไปในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งแนวโน้มในการจับไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์นั้น เมื่อแป้งสัมผัสกับน้ำกระด้างโซเดียมในตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตในโครงสร้างแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์จะหลุดออกได้ง่าย แคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำกระด้างที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี (EN) เท่ากับ 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าโซเดียมไอออน ที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี เท่ากับ 0.9 (Allen and Knight, 1992) จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต หรือสามารถยื่นยื่นแนวโน้มด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเลือก (selective coefficient) ของโซเดียม ที่มีค่าเท่ากับ 2.0 ซึ่งแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าเท่ากับ 5.2 และ 3.3 ตามลำดับ (Metcalf and Eddy, 2003) ทำให้แคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถเข้าไปแทนที่ตำแหน่งโซเดียมไอออนใน โครงสร้างของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ได้ หลังจากนั้นแนวโน้มกลไกในการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในรูปของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแป้ง โมดิฟายด์ในรูปของ polydentate ligands จะเสถียรและแข็งแรงมากกว่าการเกิด monodentate ligands จึงทำให้การจับไอออนประจุสองบวกด้วยหมู่ฟังก์ชันของฟอสเฟตอยู่ในรูปที่เสถียรและแข็งแรง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแนวโน้มกลไกในการจับไอออนของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ สอดคล้องกับการศึกษาของ Wang et al. (2011) โดยพบว่า แป้งคาร์บอกซีเมทิลมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออน Pb(II) และ Ni(II) โดยการเกิดปฏิกิริยาโคออดิเนตระหว่างหมู่คาร์บอกซิลใน โครงสร้างของแป้งและ

ไอออนโลหะประจุสองบวก ดังแสดงกลไกในรูปที่ 4.3 และแนวโน้มกลไกในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งโมดิฟายด์และโลหะยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Baharuddin et al. (2015) ศึกษาการกำจัด Zn(II) และ Pb(II) ด้วยแป้งไม่ได้ดัดแปร พบว่า โปรตอนในรูปของหมู่ไฮดรอกซิลในตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ในหน่วยกลูโคสของแป้ง สามารถสร้างพันธะกับโลหะหนักได้ อีกทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง ยังขึ้นอยู่กับค่าการแทนที่หมู่ฟังก์ชัน (DS) ของแป้งโมดิฟายด์ โดยแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์มีค่าการแทนที่หมู่ฟังก์ชันที่สูงกว่าแป้งโมดิฟายด์ประเภทอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างที่มีมากกว่า ส่งผลให้แนวโน้มการจับไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียม เกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Xu et al. (2002) ทำการศึกษาการกำจัด Cu(II) ด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่ดัดแปรโดยกระบวนการครอสลิงค์ พบว่า เมื่อค่า DS ของแป้งเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัด Cu(II) เพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในโครงสร้างของแป้งแอมโฟเทอริก ซึ่งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลจะเป็นตำแหน่งที่แสดงประจุลบ จึงสามารถจับไอออน Cu(II) ได้ดี

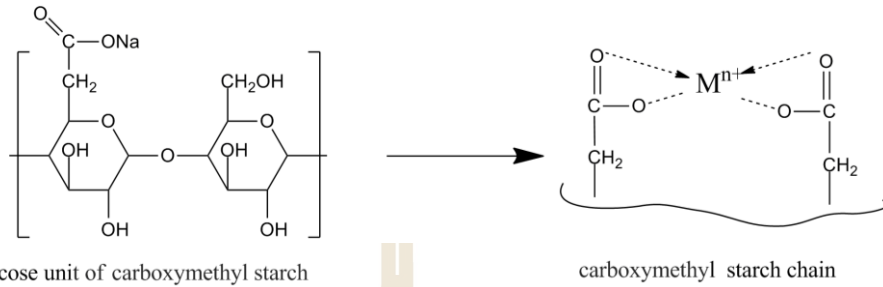
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของแป้งโมดิฟายด์

ชนิดแป้ง	หมู่ฟังก์ชัน	DS (%)	ขนาด (um)
แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต	R-C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub> Na	0.02	15
แป้งอะซิทิเลทออกซิไดซ์	R-COCH <sub>3</sub>	0.05	50-500
แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์	P=O(OH) <sub>2</sub>	0.08	3-50

ที่มา : บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด



รูปที่ 4.2 กลไกการจับไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์



**รูปที่ 4.3** กลไกการจับไอออนโลหะประจุสองบวกของแป้งคาร์บอกซีเมทิล (Wang et al., 2011)

เมื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความขุ่น และค่าของแข็งละลายน้ำของแป้งโมดิฟายด์ทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่าอยู่เกณฑ์มาตรฐานของการประปาส่วนภูมิภาค (WHO., 2011) และค่าซีโอดีของแป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนตและแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์มีค่าเท่ากับ 37.33 และ 40.00 mg/L ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าซีโอดีของแป้งอะซิทิเลทออกซิไคซ์ มีค่าเท่ากับ 128.00 mg/L ซึ่งถือว่ามีความสูง เมื่อเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดไม่เกิน 120 mg/L ค่าซีโอดีที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากแป้งโมดิฟายด์ทั้งสามชนิดเกิดการละลายน้ำ ส่งผลให้ค่าซีโอดีของน้ำหลังการดูดซับสูงขึ้น

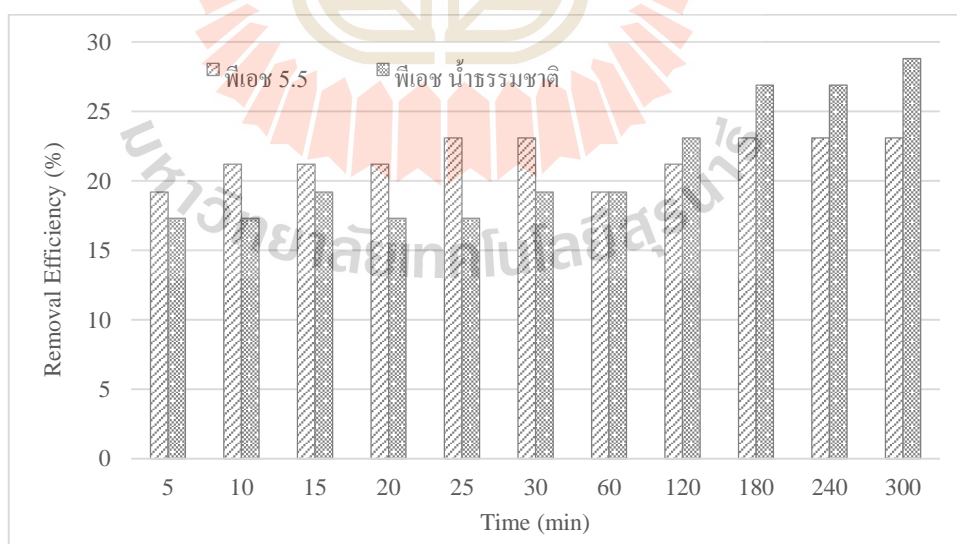
**ตารางที่ 4.4** พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์

ชนิดแป้ง โมดิฟายด์	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์		
	ความขุ่น (NTU)	TDS (mg/L)	COD (mg/L)
แป้งโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต	0.21 ± 0.04	243.33±17.56	37.33±28.38
แป้งอะซิทิเลทออกซิไคซ์	0.51 ± 0.12	336.67±7.64	128.00±17.44
แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์	0.29 ± 0.08	446.67±20.21	40.00±17.44

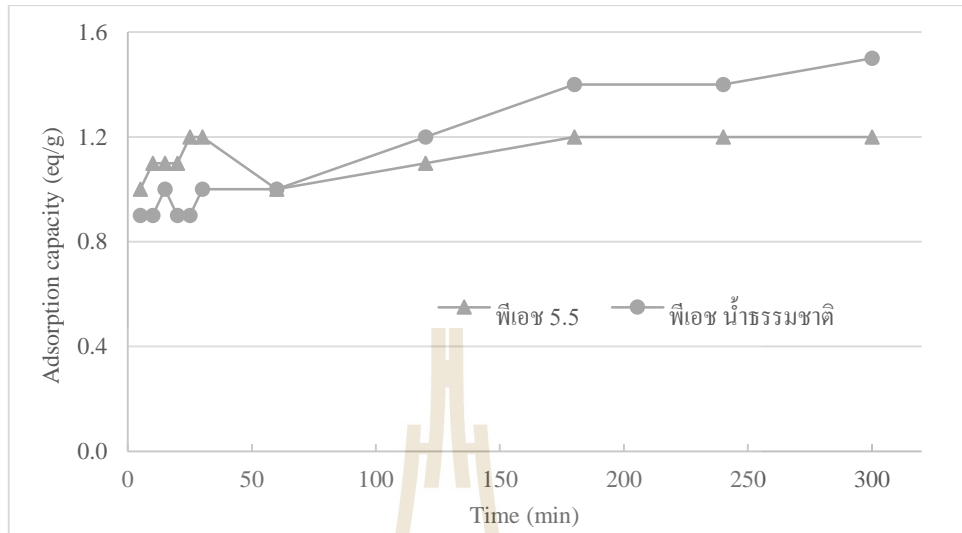
### 4.3 ผลกระทบของค่าพีเอช

ในการศึกษานี้ทำการศึกษาพีเอช 2 ช่วง ได้แก่ พีเอช 5.5 และพีเอชน้ำประปาธรรมชาติ เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพีเอช ต่อความสามารถในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาของแป้งโมดิฟายด์ พบว่า ในช่วงระยะเวลาสัมผัส 5-300 นาที น้ำประปาที่พีเอช 5.5 มีความสามารถในการกำจัดความกระด้างอยู่ในช่วง 1.00-1.20 eq/g ซึ่งมีค่าสูงกว่าพีเอชน้ำประปาธรรมชาติ (พีเอช เท่ากับ 7.5) หลังจากนั้นประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ที่

พีเอช 5.5 มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ความสามารถในการกำจัดความกระด้างที่พีเอชน้ำธรรมชาติค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 เนื่องจากเมื่อระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นพื้นที่ผิวของเบี่ยงในการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน มีโอกาสสัมผัสกันได้มากขึ้น ซึ่งในช่วงพีเอชต่ำ จะมีปริมาณของโปรตอน ( $H^+$ ) ในน้ำสูง หมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตในโครงสร้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ จะถูกโปรโตเนต (protonated) ด้วยโปรตอน หรือเกิดการแข่งขันระหว่างโปรตอนและไอออนโลหะที่ละลายในน้ำสูง (Baharuddin et al., 2015) ส่งผลให้แคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออนเกิดปฏิกิริยากับเบี่ยงได้น้อยลง (Chen and Wang, 2006) ความสามารถในการกำจัดความกระด้างจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen and Wang (2006) ใช้เบี่ยงคาร์บอกซิเมททิลในการกำจัดแคลเซียมไอออน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดแคลเซียมไอออนของเบี่ยงคาร์บอกซิเมททิลมีค่าเพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเซียมไอออนสูงสุดที่พีเอช 8 และในการศึกษาของ นิธิศ และคณะ (2017) ทำการดูดซับ Ni(II) โดยเกลบที่มีการปรับสภาพ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด Ni(II) โดยเกลบดัดแปร ที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพสูงกว่าพีเอช 5 อธิบายได้ว่าที่พีเอชต่ำ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะต่ำ เนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออนจำนวนมาก จึงทำให้เกิดการแย่งจับกับวัสดุดูดซับ และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย (Mangaleshwaran et al., 2015)



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ที่พีเอช 5.5 และพีเอชน้ำธรรมชาติ



**รูปที่ 4.5** ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ที่พีเอช 5.5 และพีเอชน้ำธรรมชาติ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ของน้ำตัวอย่างที่พีเอช 5.5 พบว่า มีค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าความขุ่น เท่ากับ 0.28 NTU ค่าซีโอดี เท่ากับ 28.55 mg/L ค่าของแข็งละลาย เท่ากับ 824.45 mg/L ส่วนในน้ำตัวอย่างที่พีเอชน้ำธรรมชาติ พบว่า มีค่าความขุ่น เท่ากับ 0.41 NTU ค่าซีโอดีเท่ากับ 37.82 mg/L ค่าของแข็งละลาย เท่ากับ 678.06 mg/L ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5 โดยค่าพารามิเตอร์ของน้ำตัวอย่างทั้งสองพีเอช มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าซีโอดีและค่าของแข็งละลายน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น หลังกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์นั้น เนื่องจากแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ มีการตัดแปรรูปด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตภายในโมเลกุลของแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง อุณหภูมิเจลลิ่งในซั้ต่ำลง มีการพองตัวที่สูงขึ้น แป้งจึงเกิดการละลายน้ำ (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546) ทำให้ค่าออกแกนิคในน้ำเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าซีโอดีและค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้นด้วย

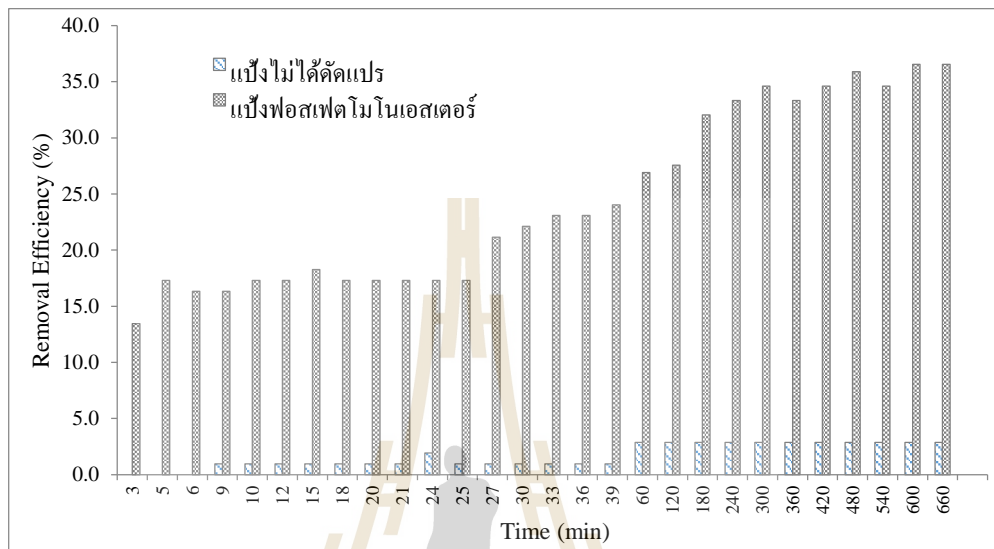
**ตารางที่ 4.5** พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดความกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 5-300 นาที

pH	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์		
	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)
5.5	0.28 ± 0.18	28.55 ± 15.13	824.45 ± 56.11
น้ำธรรมชาติ (7.5)	0.41 ± 0.20	37.82 ± 5.17	678.06 ± 80.36

#### 4.4 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส

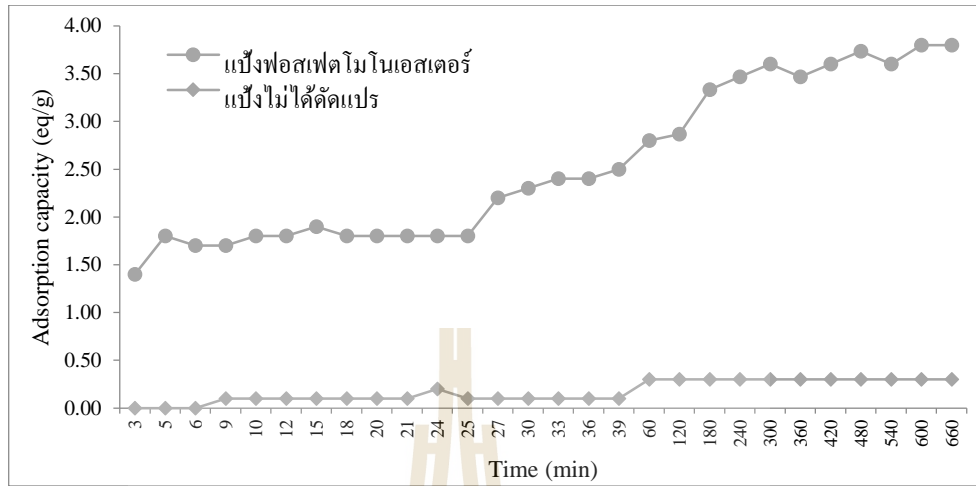
การศึกษาการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสที่ 3 - 720 นาทีในการกำจัดความกระด้างด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ 2.0 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการกำจัดความกระด้างเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาสัมผัส 5-25 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก อยู่ในช่วงร้อยละ 16.3-18.3 หลังจากระยะเวลาสัมผัสที่ 25 นาทีเป็นต้นไป ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากระยะเวลาสัมผัสที่ 300 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างเริ่มคงที่ โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุล (Bouchard et al., 2001) โดยเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวในการสัมผัสกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์และไอออนประจุสองบวกในน้ำประปาก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเบี่ยงโมดิฟายด์และไอออนประจุสองบวกในน้ำเกิดได้ดี (Crini, 2005) จึงส่งผลให้เบี่ยงโมดิฟายด์สามารถจับไอออนประจุสองบวกได้มากขึ้น ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเบี่ยงโมดิฟายด์จึงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในการศึกษานี้เลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 5 นาที โดยสามารถลดค่าความกระด้างทั้งหมดจาก 103.89 mg/L as CaCO<sub>3</sub> เหลือ 86.00 mg/L as CaCO<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างร้อยละ 17.31 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และความสามารถในการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 1.80 eq/g ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เบี่ยงมันสำปะหลังไม่ได้ตัดแปร พบว่า เบี่ยงมันสำปะหลังไม่ได้ตัดแปร มีความสามารถในการกำจัดความกระด้างได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยอยู่ในช่วง 0-0.07 eq/g ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งในการศึกษาของ Chen and Wang (2006) ใช้เบี่ยงโครอสติลล์ คาร์บอกซิเมททิล ที่ความเข้มข้น 2 mmol/L ในการกำจัดแคลเซียมไอออน พบว่า ความสามารถในการดูดซับของเบี่ยงโครอสติลล์ คาร์บอกซิเมททิลเริ่มคงที่ หลังจากระยะเวลาสัมผัส 18 นาทีเป็นต้นไป แสดงถึงการอิ่มตัวของเบี่ยงเมื่อเข้าสู่สมดุล มีค่าความสามารถในการกำจัดแคลเซียมเท่ากับ 2 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และในการศึกษาของ Dong et al. (2010) ศึกษาการกำจัด Cu(II) และ Cr(VI) ด้วยเบี่ยงอะมิโน พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักทั้งสองชนิดเพิ่มสูงขึ้น และเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 120 นาทีเป็นต้นไป โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาที่มากขึ้น ส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันของเบี่ยงอะมิโนสามารถเกิดปฏิกิริยาดูดซับกับโลหะหนักได้มากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า เบี่ยงโมดิฟายด์หลายชนิดมีความสามารถในการกำจัดโลหะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ นอกจากประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส

แล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกด้วย เช่น ความเข้มข้นของตัวดูดซับ ค่าพีเอช และอุณหภูมิ เป็นต้น (Rolence et al., 2016; Dogan et al., 2009)



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์ และแป้งมันสำปะหลังไม่ได้ตัดแปร

ในการศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ระยะเวลาสัมผัสที่น้อย จะส่งผลต่อพื้นที่ในการติดตั้งระบบที่น้อยลง เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบกะ ซึ่งจำเป็นต้องใช้พื้นที่จำกัดในการติดตั้งระบบ และลดงบประมาณในการก่อสร้างระบบ จึงเลือกระยะเวลาสัมผัสเหมาะสมเท่ากับ 5 นาที จากการศึกษาแล้วยังพบว่า ระยะเวลาสัมผัส 600-660 นาที แป้งโมดิฟายด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา โดยมีความสามารถในการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 3.80 eq/g



รูปที่ 4.7 ความสามารถในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาของแปะงโฟสเฟต โมโนเอสเตอร์ และแปะงไม้ได้คัดแปร

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	พีเอช	ระยะเวลาสัมผัส (min)	ความสามารถในการดูดซับ		อ้างอิง
				การดูดซับ	หน่วย	
Crosslink Carboxymethyl	Ca (II)	8	18	2	eq/g	Chen and Wang., 2006
Purolite UK resin	Hardness	0-14	< 30	1.9	eq/L	Marine water supply company
Dowex IR100 resin	Hardness	0-14	< 30	1.8-2.0	eq/L	Dow Chemical company
Phosphate monoester	Hardness	7	5	1.8	eq/g	Present work

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที ของการกำจัดความกระด้างด้วยแปะงที่ไม่ได้คัดแปร ได้แก่ ค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 2.45 NTU ค่าซีโอดี เท่ากับ 36.00 mg/L และค่าของแข็งละลาย เท่ากับ 265.00 mg/L ส่วนคุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแปะงโฟสเฟต โมโนเอสเตอร์ พบว่า ค่าความขุ่น เท่ากับ 0.26 NTU ค่าซีโอดี เท่ากับ 36.00 mg/L และค่าของแข็งละลาย เท่ากับ 305.33 mg/L ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งทั้งแปะงที่ไม่ได้คัดแปรและแปะงโฟสเฟต โมโนเอสเตอร์



สเตอร์มีค่าพารามิเตอร์อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ค่าซีไอดีและค่าของแข็งละลายน้ำหลังผ่านการกำจัดด้วยกระบวนการของแบริ่ง มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบริ่งทั้งสองชนิด เกิดการละลายน้ำได้ ทำให้ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าสูงขึ้น (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546)

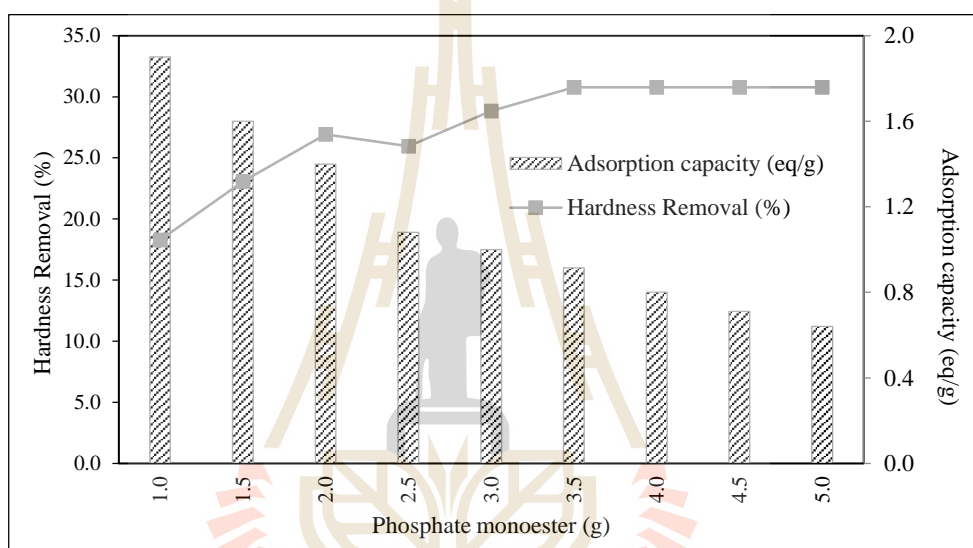
ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแบริ่งโมดิฟายด์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที

ชนิดแบริ่ง	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแบริ่งโมดิฟายด์		
	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)
แบริ่งไม่ได้ตัดแปร	2.45 ± 0.01	36.00 ± 2.00	265.00 ± 1.00
แบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์	0.26 ± 0.01	36.00 ± 2.00	305.33 ± 3.06

#### 4.5 ผลกระทบของปริมาณแบริ่งโมดิฟายด์

การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ที่เพิ่มขึ้นกับความสามารถในการกำจัดความกระด้าง โดยทำการแปรเปลี่ยนปริมาณแบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ 1.0-5.0 กรัม พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 1.0-5.0 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.27 เป็นร้อยละ 30.77 สามารถอธิบายได้จากปริมาณแบริ่งที่สูงขึ้น พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณแบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ จะทำให้ปริมาณของความกระด้างที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของแบริ่งลดลง ดังรูปที่ 4.8 อธิบายได้จากพื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างแบริ่งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์กับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำ เกิดการสัมผัสกันได้ไม่ทั่วถึง เนื่องจากปริมาณแบริ่งที่สูงขึ้นจนเข้มข้นมากเกินไป ทำให้การดูดติดด้วยแรงของไอออนจากแรงทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมีเกิดได้ลดลง (Chen and Wang, 2006; โกวิทช์ และคณะ, 2008) จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของแบริ่งโมดิฟายด์ลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Doulia et al. (2009) ศึกษาการดูดซับกรดฮิวมิกบนถ่านกัมมันต์เบนทอนไนต์ พบว่า ที่สภาวะสมดุล ประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเบนทอนไนต์ แต่อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับกลับลดลง โดยประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว ที่สามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้ แต่ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจาก กระบวนการดูดซับถึงจุดอิ่มตัว ทำให้ไม่เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น และในการศึกษาของ พลากร บุญใส และคณะ (2015) พบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับซีโอไลต์ ทำให้ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์ชนิด suz-4 ลดลง เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลงด้วย เนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณฟีนอลที่อยู่ใน

สารละลาย แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) และการแทรกแซงระหว่างบริเวณที่เกิดการดูดซับ (binding site) (โกวิทย์ และคณะ, 2008) และจากผลการศึกษานี้ เลือกระดับของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ที่เหมาะสม เท่ากับ 2.0 กรัม โดยแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 27 โดยที่ปริมาณดังกล่าว แข็งยังไม่เกิดการอิ่มตัว สามารถหมุนเวียนแข็งกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกครั้งในระบบ เพื่อประหยัดต้นทุนในการซื้อวัสดุดูดซับ และใช้วัสดุดูดซับให้เกิดประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับความกระด้างในน้ำของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

การวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ของการกำจัดความกระด้างด้วยแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ได้แก่ ค่าพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 6.69-7.12 ซึ่งพบว่า เมื่อปริมาณแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น ค่าพีเอชของน้ำลดลง อาจเนื่องมาจาก เมื่อแข็งละลายน้ำ โปรตอน ( $H^+$ ) ในตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสในโครงสร้างของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ หลุดออกมาได้ง่าย และถูกแทนที่ด้วยไอออนโลหะประจุสองบวก จึงทำให้น้ำมีค่าพีเอชที่ลดลง ส่วนค่าความขุ่น อยู่ในช่วง 0.14-0.45 NTU ส่วนค่าซีโอดี พบว่าอยู่ในช่วง 32.00-88.00 mg/L และค่าของแข็งละลาย มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น โดยอยู่ในช่วง 362.00-1232.33 mg/L ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งเมื่อปริมาณของแข็งที่ใช้ในการทดลองเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มการละลายน้ำของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์มีโอกาสเกิดได้มากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ค่าซีโอดี และค่าของแข็งละลายเพิ่มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

ปริมาณแป้ง (กรัม)	คุณสมบัติน้ำหลังกำจัดด้วยแป้ง โมดิฟายด์				
	pH	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)
1.0	7.12 ± 0.02	85.33 ± 1.15	0.23 ± 0.00	44.00 ± 2.00	362.00 ± 2.00
1.5	7.03 ± 0.01	80.00 ± 0.00	0.16 ± 0.01	32.00 ± 2.00	420.33 ± 3.06
2.0	6.98 ± 0.01	76.00 ± 0.00	0.15 ± 0.00	56.00 ± 0.00	460.00 ± 1.00
2.5	6.92 ± 0.01	77.33 ± 1.15	0.14 ± 0.01	56.00 ± 2.00	555.33 ± 0.58
3.0	6.89 ± 0.00	74.00 ± 0.00	0.15 ± 0.02	52.00 ± 2.00	687.00 ± 1.00
3.5	6.86 ± 0.00	72.00 ± 0.00	0.18 ± 0.02	88.00 ± 0.00	810.00 ± 2.00
4.0	6.82 ± 0.00	72.00 ± 0.00	0.24 ± 0.02	72.00 ± 2.00	840.00 ± 0.00
4.5	6.80 ± 0.01	72.00 ± 0.00	0.45 ± 0.01	88.00 ± 0.00	1,050.33 ± 0.58
5.0	6.69 ± 0.01	72.00 ± 0.00	0.43 ± 0.00	68.00 ± 0.00	1,232.33 ± 3.06

#### 4.6 จลนพลศาสตร์

เพื่อศึกษากลไกการดูดซับความกระด้างในน้ำประปาด้วยแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลหรือการแพร่ของสารตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของแป้ง โมดิฟายด์กับระยะเวลาที่ดำเนินไป โดยศึกษาจากแบบจำลองสมการอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และแบบจำลองสมการอันดับสองเทียม (pseudo-second order) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด

แบบจำลองสมการอันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิววัสดุดูดซับกับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ โดยอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (4.1)$$

เมื่อ  $q_t$  หมายถึง ความสามารถในการดูดซับความกระด้าง ณ เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

$q_e$  หมายถึง ความสามารถในการดูดซับความกระด้าง ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

$k_1$  หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (นาที<sup>-1</sup>) และ

$t$  หมายถึง เวลาใดๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

แบบจำลองสมการอันดับสองเทียม ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดซับของสารถูกดูดซับ เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

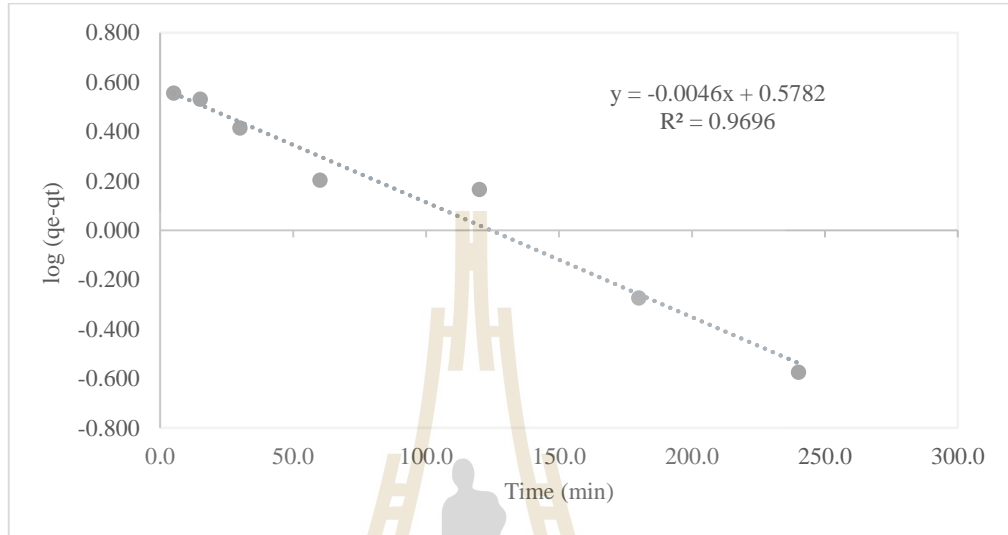
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.2)$$

โดยที่ค่า  $k_2$  หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัม/มิลลิกรัม-นาที)

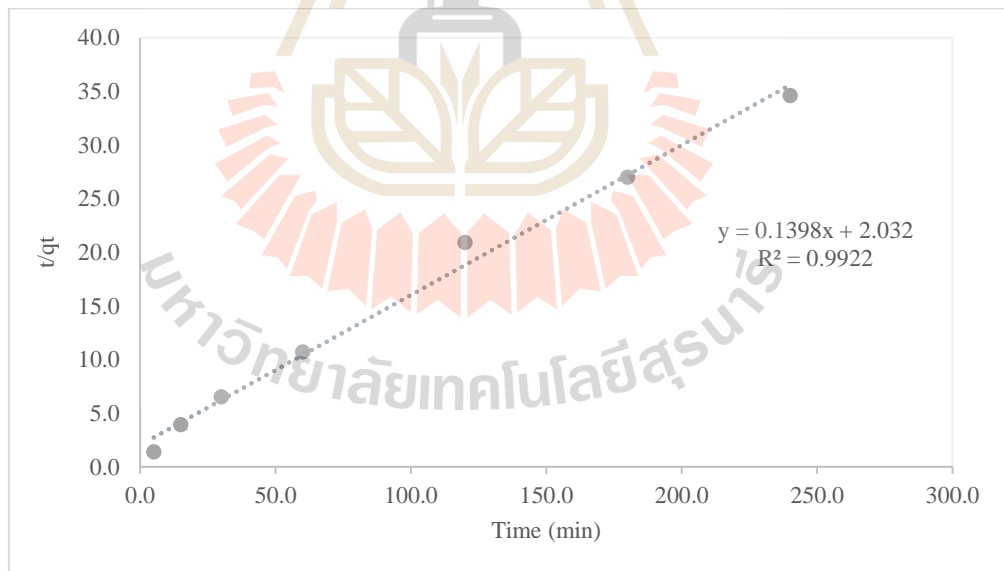
โดยความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างในน้ำประปาของแปปิ้ง ฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ พิจารณาจากการเปรียบเทียบจากความสามารถในการดูดซับความกระด้าง ในน้ำประปาของผลการทดลอง ( $Q_{exp}$ ) และผลการคำนวณ ( $Q_{cal}$ ) และพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  ตามสมการอันดับหนึ่งเทียม ดังรูปที่ 4.9 สามารถหา  $k_1$  ได้จากค่าความชัน และ  $q_e$  จากจุดตัดแกน  $y$  เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9696 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ในขณะที่เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  ตามสมการอันดับสอง เทียม ดังรูปที่ 4.10 สามารถหา  $k_2$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และ  $q_e$  ได้จากความชันของเส้นกราฟ พบว่ามี ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9922 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งความสามารถในการดูดซับความกระด้างในน้ำประปาของแปปิ้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ โดยการคำนวณจากสมการอันดับสองเทียม มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียม และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการอันดับสองเทียม มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง เท่ากับ  $9.63 \times 10^{-3}$  กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที โดยแบบจำลองการดูดซับที่ สอดคล้องกับอันดับสองเทียม อธิบายได้ว่า อัตราควบคุมการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแรงทางเคมี (Chemical Force) (Nwabanne et al., 2012) โดยอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ ตัวถูกดูดซับยกกำลังสอง กลไกการดูดซับความกระด้างของแปปิ้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น

เกิดจากกลไกการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จากการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (Septum et al., 2007)



รูปที่ 4.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมนิวาเลนต์ อันดับหนึ่งเทียม



รูปที่ 4.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมนิวาเลนต์ อันดับสองเทียม

ตารางที่ 4.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ อันดับหนึ่ง เทียม และอันดับสองเทียม

Q <sub>e</sub> (exp)	First order			Second order		
	R <sup>2</sup>	k <sub>1</sub> (min <sup>-1</sup> )	Q <sub>e</sub> (cal)	R <sup>2</sup>	k <sub>2</sub> (g/mg.min)	Q <sub>e</sub> (cal)
7.6	0.9696	0.0106	3.79	0.9922	9.63x10 <sup>-3</sup>	7.15

#### 4.7 สมดุลการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประมาณความสามารถในการดูดซับ สามารถบ่งบอกลักษณะของการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเบี่ยงโมดิฟายด์กับความเข้มข้นของความกระด้างทั้งหมดที่เหลืออยู่ ที่สภาวะสมดุล อุณหภูมิคงที่ ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการทดสอบสมดุลการดูดซับด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และแบบจำลองของฟรุนดิช (Freudlich Isotherm)

แบบจำลองของแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือ โมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของวัสดุดูดซับ โดยพลังงานในการดูดซับจะเท่ากันทุกจุดของบริเวณที่เกิดการดูดซับ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งจะเกิดการดูดซับทางเคมีเป็นส่วนใหญ่ (Evanglou, 1988) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \frac{1}{C_e} \quad (4.3)$$

เมื่อ q<sub>e</sub> หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q<sub>m</sub> หมายถึง ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K<sub>L</sub> หมายถึง ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C<sub>e</sub> หมายถึง ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

แบบจำลองฟรุนดิช ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยึดจับกันเป็นชั้น (multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surface) พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว สามารถใช้อธิบายได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพ

และทางเคมี และระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด (Cheng et al., 2009) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log c_e + \log K_F \quad (4.4)$$

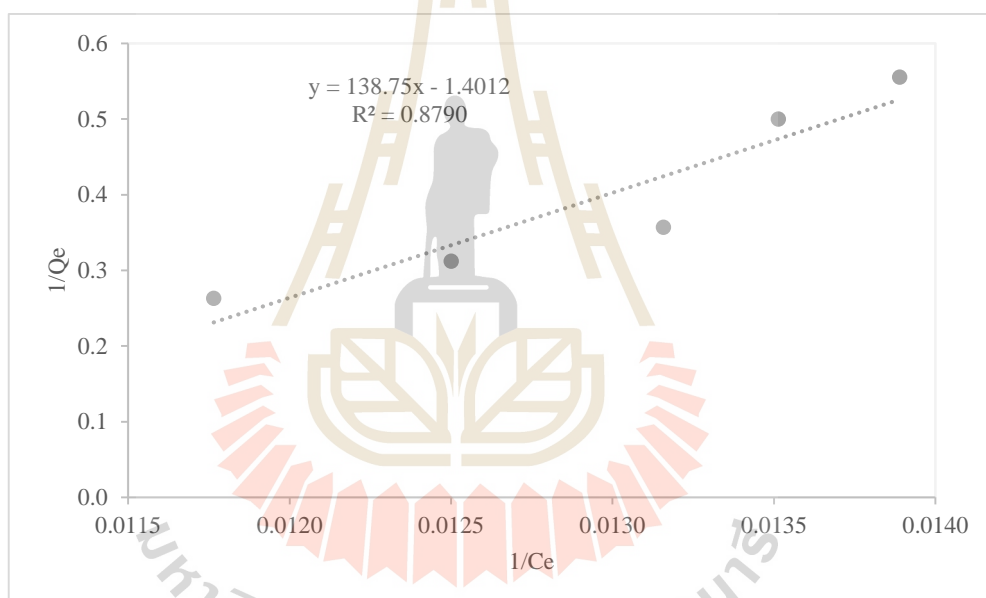
เมื่อ  $K_F$  หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$n$  หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

แบบจำลองไอโซเทอร์มของการกำจัดความกระด้างโดยใช้แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ เมื่อเขียนกราฟแบบจำลองของแลงเมียร์ระหว่าง  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  จะได้รับความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สามารถคำนวณหา  $q_m$  และ  $K_L$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และความชัน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8790 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ในขณะที่เมื่อเขียนกราฟแบบจำลองของฟรุนดิชระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้รับความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 สามารถหาค่า  $K_F$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และหาค่า  $n$  ได้จากค่าความชันของกราฟ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9142 โดยความถูกต้องของไอโซเทอร์ม พิจารณาจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ อธิบายได้ว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และพลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน โดยสมมติฐานของการดูดซับความกระด้างด้วยแป้งโมดิฟายด์ แนวโน้มการดูดซับอาจเนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมกับ โซเดียมในตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตในโครงสร้างของแป้ง หลังจากนั้น มีแนวโน้มที่ไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนในตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสของแป้งในลำดับต่อมา จึงทำให้พลังงานในการเกิดพันธะแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาค่า  $n < 1$  ( $1/n > 1$ ) สามารถอธิบายได้ว่า บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ แต่อย่างไรก็ตาม สมดุลการดูดซับโลหะประจุสองบวกด้วยแป้งโมดิฟายด์ ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแป้ง โมดิฟายด์กับโลหะประจุสองบวก การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน รวมทั้งเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น (Guo et al., 2009; Chen and Wang., 2006) แต่สำหรับสมการแลงเมียร์ หากพิจารณาค่า  $q_m$  และค่า  $K_L$  ที่คำนวณ

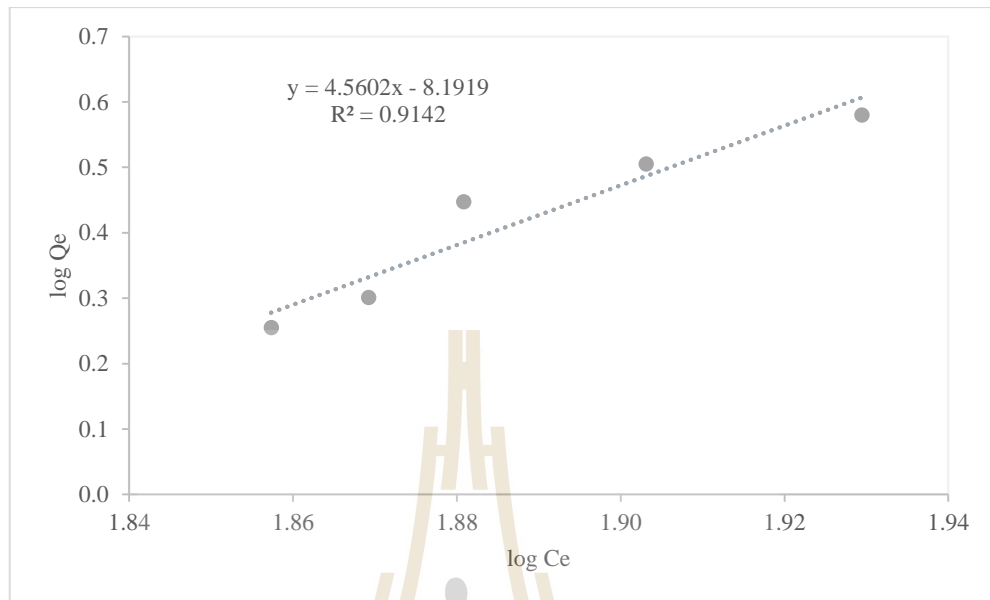
ได้ พบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าติดลบ ซึ่งหมายความว่า การดูดซับที่เกิดขึ้น ไม่ได้เป็นการดูดซับชั้นเดียว หรือสมการแลงเมียร์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาอธิบายกลไกการดูดซับความกระด้างของเบ้งโมดิฟายด์

ในการศึกษาของ Sephehr et al. (2013) ศึกษาการกำจัดความกระด้าง แคลเซียมและแมกนีเซียม ไอออนด้วยหินพัมมิสตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ผลการศึกษาพบว่า หินพัมมิสตัดแปรมีความสามารถในการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียม ไอออนสูงถึง 62.34 และ 56.11 mg/g ตามลำดับแบบจำลองสมดุลสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียมและไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช อธิบายว่า



รูปที่ 4.11 สมดุลการดูดซับความกระด้างของเบ้งฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์ (Langmuir model)





**รูปที่ 4.12** สมดุลการดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์ (Freundlich model)

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ในการศึกษาของจักรกฤษณ์ และคณะ (2017) ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช และแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเทียม อธิบายได้ว่า สีย้อมเข้าไปยึดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในลักษณะหลายชั้น โดยผลการทดลองไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (ค่า  $q_m$  และค่า  $K_L$  ที่คำนวณได้จากการทดลองติดลบ) และในการศึกษาของ Liu et al. (2019) ทำการศึกษาการดูดซับ Pb(II) ด้วยเปลือกเมล็ดชาน้ำมันในน้ำ ผลการศึกษากลไกในการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียมและไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชเช่นกัน โดยเกิดการดูดซับในทางเคมี และอีกหลากหลายงานวิจัยยืนยันแนวโน้มในการดูดซับโลหะหนักประจุสองบวกด้วยวัสดุดูดซับคัดแปรจากการเกษตรที่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Rolence et al., 2014; Shariful et al., 2017; Guiza, 2017)

**ตารางที่ 4.10** สมดุลการดูดซับความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์ Langmuir model และ Freundlich model

Langmuir			Freundlich		
$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$K_F$ (mg/g)*(L/g)	n	$R^2$
-0.71	-0.01	0.8790	$6.43 \times 10^{-9}$	0.22	0.9142

จากการศึกษาแบบจำลองสมดุลการดูดซับ สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณแบริ่งฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์ที่ต้องการต่อปริมาณการกำจัดความกระด้าง (Adsorbent used rate, AUR) สำหรับใช้ในการดูดซับความกระด้างในน้ำ เมื่อสมดุลการดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรุนดิช เขียนได้ดังสมการ (4.5) และ (4.6) (Lee and Lin., 1999)

$$AUR = \frac{(C_i - C_e)}{K_f C_e^{1/n}} \quad (4.5)$$

$$AUR = \frac{(C_i - C_e)}{6.43 \times 10^{-9} C_e^{4.54}} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $C_i$  หมายถึง ความเข้มข้นของความกระด้างที่เข้ากระบวนการดูดซับ (mg/L as CaCO<sub>3</sub>)

$C_e$  หมายถึง ความเข้มข้นของความกระด้างที่ออกจากกระบวนการดูดซับ (mg/L as CaCO<sub>3</sub>)

## ส่วนที่ 2 : การศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดความกระด้างด้วยแบริ่ง โมดิฟายด์ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ (1) การแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ (2) การแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท (3) การหมุนเวียนตัวดูดซับกลับมาใช้งาน (4) ผลกระทบของสารก่อตะกอนต่อการอุดตันของเมมเบรน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 4.8 คุณภาพน้ำประปาก่อนเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ทำการติดตั้งระบบอัลตราฟิลเตรชัน ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการเดินระบบในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 – เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 พบว่า น้ำประปามีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.11 โดยมีค่าพีเอช เท่ากับ 7.46 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติของพีเอชน้ำดิบจากธรรมชาติ ค่าของแข็งละลายน้ำ เท่ากับ 233.50 mg/L ค่าซีโอดีและค่าความขุ่น เท่ากับ 18.98 mg/L และ 0.63 NTU ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำประปามาตรฐานของการประปาส่วนภูมิภาค (WHO., 2011) และมีค่าความกระด้างทั้งหมดเท่ากับ 165.50 mg/L as CaCO<sub>3</sub> หรือ 3.31 meq/L อยู่ในเกณฑ์น้ำกระด้าง (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 พ.ศ. 2521) ซึ่งก่อให้เกิดคราบตามสุขภัณฑ์ และคราบเหลืองตามเสื้อผ้า (Mustapha et al., 2016) หากมีการอุปโภค บริโภคน้ำกระด้าง สามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพได้ (Chiu et al., 2010) และยังสามารถส่งผลต่ออุตสาหกรรมบางประเภท เช่น ก่อให้เกิดคราบตะกอนในระบบหม้อต้มไอน้ำอีกด้วย (Reddirootr, 2016)

ตารางที่ 4.11 คุณภาพน้ำประปาก่อนเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชัน

น้ำประปา	ค่าเฉลี่ย	SD.
pH	7.46	0.20
TDS (mg/L)	233.50	29.57
COD (mg/L)	18.98	7.89
Turbidity (NTU)	0.63	0.20
Hardness (meq/L)	3.31	0.16
Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	165.50	7.79

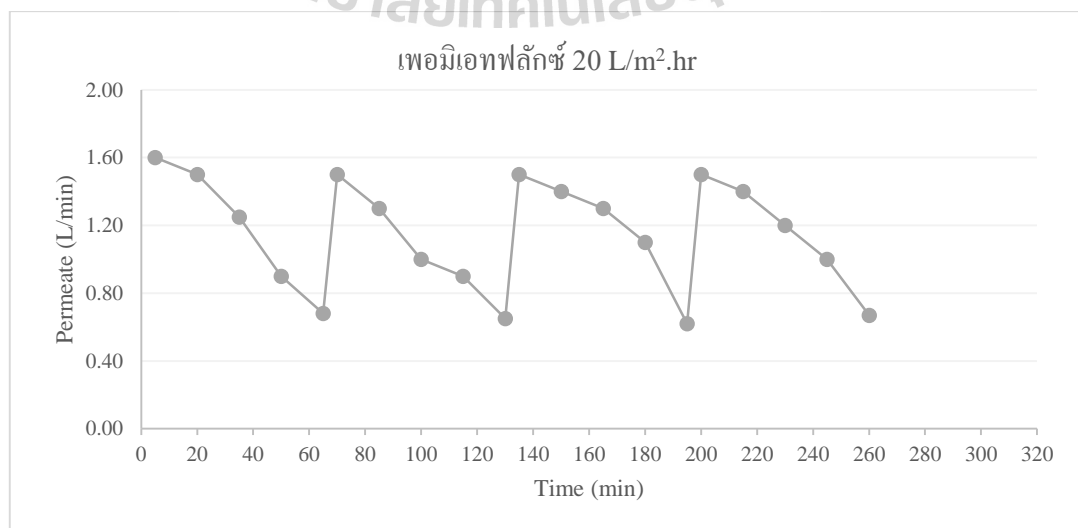
#### 4.9 ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์

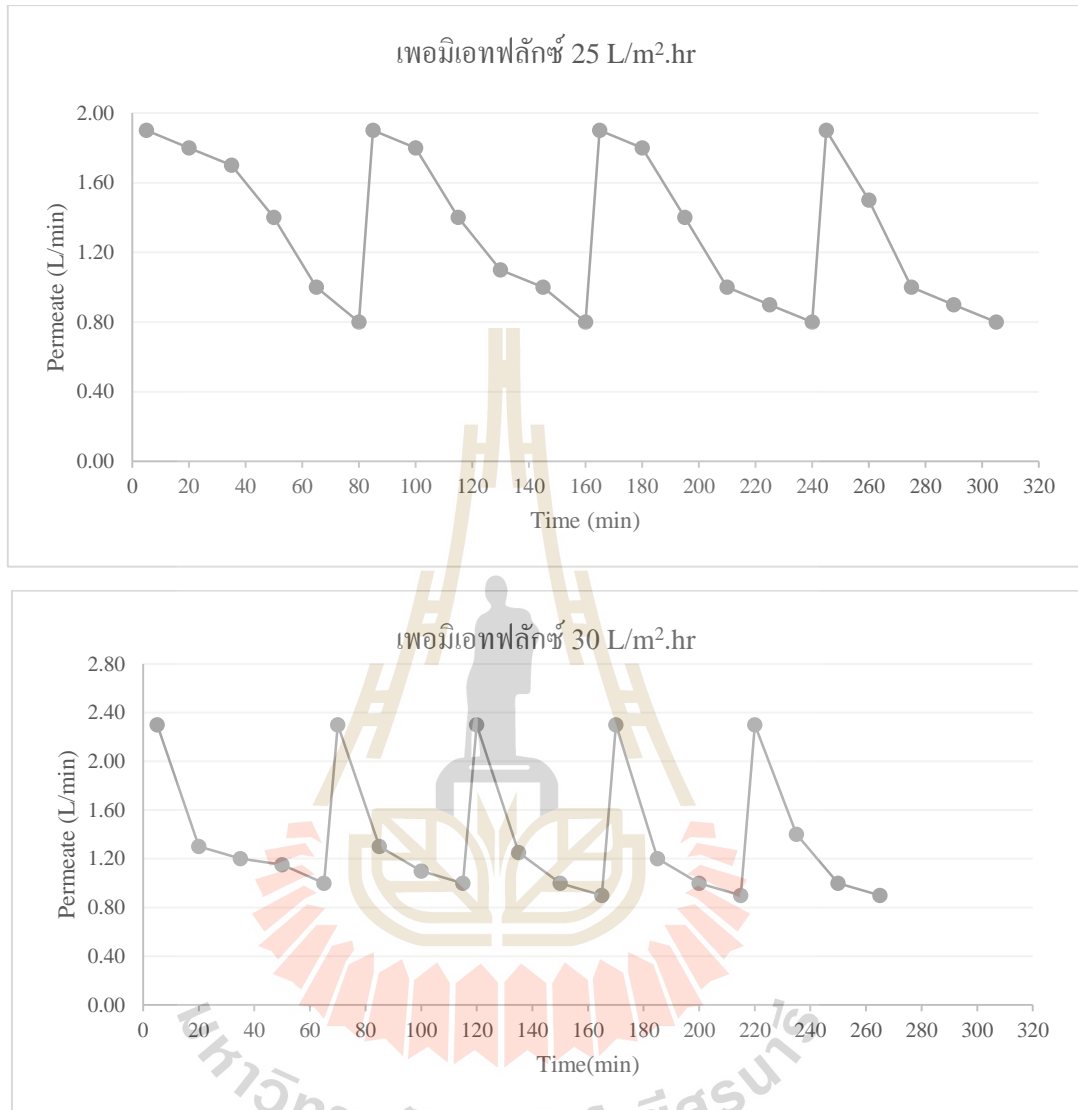
ทำการศึกษการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ ที่ 20 25 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr เพื่อหาค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสม โดยทำการเดินระบบจนกระทั่งเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% ซึ่งแสดงถึงสถานะที่ระบบเมมเบรนเริ่มเกิดการอุดตัน โดยพบว่า ระยะเวลาในการอุดตันของเมมเบรน ที่เพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 25 L/m<sup>2</sup>.hr เกิดการอุดตันได้ช้ากว่าที่เพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 20 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr ดังรูปที่ 4.13 โดยที่เพอมีเอทฟลักซ์ เท่ากับ 30 L/m<sup>2</sup>.hr ค่าเพอมีเอทลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 20 นาทีแรกของกระบวนการ และค่อยๆลดลงหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที จนถึง 65 นาที ซึ่งมีค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% จากนั้นจึงทำการหยุดเดินระบบ ซึ่งการลดลงของเพอมีเอทสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอนุภาคแข็ง โมดิฟายด์ที่เกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรน หรือเรียกว่า คอนเซ้นเตรชันโพลาไรเซชัน (CP) (Singh and Cheryan, 1997) โดยการเกิดชั้นเจลของแข็ง โมดิฟายด์ ส่งผลต่อความต้านทานการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้เพอมีเอทลดลง (Baharuddin et al, 2015) หลังจากนั้น ทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อชะล้างสิ่งอุดตันออก และทำการล้างย้อน (backwash) เป็นเวลา 2 นาที จึงเริ่มทำการเดินระบบในรอบถัดไป ในการศึกษา นี้ เมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มจาก 20 L/m<sup>2</sup>.hr เป็น 25 L/m<sup>2</sup>.hr ส่งผลให้อัตราการไหลสูงขึ้น ทำให้การเกาะติดของอนุภาคที่สะสมเป็นชั้นก่อกหลุดออกและมีความหนาลดลง เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) ทำให้แรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้น ส่งผลให้การสะสมของอนุภาคแข็ง โมดิฟายด์ที่ผิวหน้าของเมมเบรนลดลง (รูปนัย ฤทธิไพโรจน์, 2548) จึงเกิดการอุดตันได้ช้ากว่าที่ 20 L/m<sup>2</sup>.hr และเมื่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 30 L/m<sup>2</sup>.hr จะทำให้การสะสมของอนุภาคแข็ง โมดิฟายด์ที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงขึ้น อนุภาคบางส่วนจะถูกดูดติดเข้าไปในรูพรุนของ

เมมเบรนและสะสมที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน อาจทำให้เกิดการอุดตันแบบฟาวลิง (fouling) ในลำดับต่อมา (Wang et al., 2008) จึงทำให้ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ 20 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr เกิดการอุดตันได้เร็วกว่าที่ 25 L/m<sup>2</sup>.hr

เช่นเดียวกับการศึกษาของ Jiffirin et al. (1993) ศึกษาการแปรเปลี่ยนค่าฟลักซ์ของไวน์ โดยกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกของการกรอง และเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า เนื่องจากสารป้อนเข้าผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า แต่การอุดตันที่เกิดเป็นการอุดตันที่เกิดภายในรูพรุนและผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งส่งผลให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว และในการศึกษาของ รูปนีย์ ฤทธิไพโรจน์ (2548) ศึกษาการอุดตันในกระบวนการกรองน้ำตาลโตนด พบว่า ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 20 นาทีแรกของการกรอง ที่ความดัน 1.5 และ 3 บาร์ และค่าฟลักซ์เริ่มคงที่ หลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที จนถึง 150 นาที โดยความดันระบบที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันจะเป็นการเพิ่มแรงดันขับให้ตัวทำละลายผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้มากขึ้น และในการศึกษาของ Bergamasco et al. (2011) ศึกษาการลดลงของฟลักซ์ในน้ำผิวดิน ที่ความดัน 2 บาร์ พบว่า ค่าเพอมีเอทฟลักซ์มีการลดลงอย่างรวดเร็ว ภายในช่วง 30 นาทีแรกของการเดินระบบ และเข้าสู่สภาวะคงที่จนกระทั่ง 180 นาที ซึ่งเกิดจากอนุภาคเกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรน

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา โดยใช้แ่งโปติฟายด์ ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า ที่ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ 25 L/m<sup>2</sup>.hr มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างอยู่ที่ 40.79% และมีความสามารถในการกำจัดความกระด้างของแ่งโปติฟายด์อยู่ที่ 1.04 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.12





**รูปที่ 4.13** ผลของการแปรเปลี่ยนเพอมีเอทฟลักซ์ 20 25 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr

เมื่อทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า ค่าพีเอชที่เพอมีเอทฟลักซ์ 20 25 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr มีค่าลดลง เหลืออยู่ในช่วง 6.29-6.36 ซึ่งน้อยกว่าพีเอชของน้ำประปา ก่อนเข้าระบบ เนื่องจากเมื่อแข็งละลายน้ำ โปรตอน (H<sup>+</sup>) ที่เกาะอยู่ในตำแหน่งไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของแข็ง หลุดออกมาได้ง่าย และถูกแทนที่ด้วยไอออนโลหะประจุสองบวก จึงส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำลดลง ผลการศึกษาค่าของแข็งละลายน้ำ และค่าซีโอดีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าน้ำประปา ก่อนเข้าระบบ เนื่องจาก แข็งโมดิฟายด์ เมื่อละลายน้ำ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะสามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ (Baek et al., 2007) ส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำและค่าซีโอดีเพิ่มสูงขึ้น และผลการศึกษา

ความขุ่น พบว่า ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ 20 25 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.65-0.79 NTU ซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำประปา ก่อนเข้าระบบ เนื่องจากระบบอัลตราฟิลเตรชันสามารถแยกสารอนุภาคขนาดใหญ่ได้ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดี (Kim et al., 2002) เช่นเดียวกับ การศึกษาของ Bergamasco et al. (2011) พบว่า ระบบอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัด ความขุ่นของน้ำผิวดิน 99.7% ที่ความดัน 2 บาร์ ในการศึกษาครั้งนี้เมื่อนำข้อมูลผลการศึกษาไปทำการ ทดสอบทางสถิติโดยใช้ Paired T-Test พบว่า ผลการศึกษาค่าความขุ่น และค่าพีเอชไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value > 0.05) ส่วนผลการศึกษาค่าซีโอดี ค่าของแข็งละลายน้ำ และ ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ (p-value < 0.05)

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแป้ง โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตรา ฟิลเตรชัน

Permeate flux (L/m <sup>2</sup> .hr)	ความกระด้างคงเหลือ (meq/L)		Efficiency (%)	Absorption capacity (eq/g)
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย		
20	1.76-2.24	2.02±0.13	33.55	0.85
25	1.44-2.00	1.80±0.13	40.79	1.04
30	1.60-2.00	1.86±0.11	38.82	0.99

ตารางที่ 4.13 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แป้ง โมดิฟายด์

Permeate flux (L/m <sup>2</sup> .hr)	pH		TDS (mg/L)		COD (mg/L)		Turbidity (NTU)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
20	6.10-6.44	6.29±0.07	601-1,287	980.50±167.70	86.40-134.40	107.04±12.98	0.13-1.35	0.79±0.34
25	6.28-6.57	6.36±0.07	608-984	840.74±109.10	38.40-106.60	69.70±18.00	0.14-1.12	0.65±0.33
30	6.25-6.45	6.34±0.06	629-1,289	888.57±163.50	48.00-115.20	83.66±17.56	0.17-1.17	0.68±0.35

จากการศึกษาการแปรเปลี่ยนค่าเพอมีเอทฟลักซ์ ที่ส่งผลต่อการกำจัดความกระด้างด้วยแป้ง โมดิฟายด์ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมในการศึกษา นี้ คือ 25 L/m<sup>2</sup>.hr เนื่องจากสามารถยืดระยะเวลาการอุดตันของระบบอัลตราฟิลเตรชันได้ดีกว่าที่ 20 และ 30 L/m<sup>2</sup>.hr โดยค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% ที่ระยะเวลา 85 นาที และที่เพอมีเอทฟลักซ์ 25

L/m<sup>2</sup>.hr แปรโปสเฟตโมโนเอสเตอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุด เท่ากับ 1.04 eq/g

#### 4.10 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท

ทำการศึกษาสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 25:75 50:50 และ 75:25 โดยพบว่า เพอมีเอทต่อรีเทนเททที่สัดส่วน เท่ากับ 25:75 มีอายุการใช้งานของเมมเบรนนานที่สุด โดยพิจารณา จากค่าเพอมีเอทที่ค่อยๆลดลง และดำเนินต่อไปเป็นเวลา 245 นาที จากนั้นจึงทำการหยุดเดินระบบ และทำความสะอาดเมมเบรนโดยใช้น้ำสะอาด และล้างย้อนเป็นเวลา 2 นาที จึงเริ่มทำการเดินระบบ รอบถัดไป โดยเพอมีเอทที่ลดลง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของแบ็ง โมดิฟายด์ เนื่องจากแบ็งมี คุณสมบัติในการเกิดเจลาคิโนซ์ (Baharuddin et al., 2015) ทำให้คุณสมบัติของ โครงสร้างแบ็ง เปลี่ยนไป ซึ่งทำให้เกิดขการสะสมอนุภาคของแบ็งที่ผิวหน้าของเมมเบรน (Wijmans et al., 1985 ; Konovalova et al., 2016) หรือปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Cheryan, 1986 และ Sandra, 2000) ซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจาก เพอมีเอทฟลักซ์ที่น้อย ทำให้แรงเฉือนที่ผิวหน้าของเมมเบรนต่ำ อีกทั้งการเกิด CP อาจส่งผลให้เกิดการอุดตันในรูพรุนเมมเบรนในลำดับต่อมา (Hartono and Wenten, 2005) เมื่อสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเพิ่มขึ้นเป็น 50:50 อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้เร็วกว่าที่สัดส่วน เท่ากับ 25:75 แต่เมื่อพิจารณาถึงน้ำเพอมีเอทที่ได้จากระบบอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการอุปโภคและบริโภค สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 50:50 จะได้ปริมาณน้ำเพอมีเอทที่มากกว่า และเมื่อสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเพิ่ม จาก 50:50 เป็น 25:75 พบว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนที่สูง ส่งผลให้ความเร็วที่ผ่านเยื่อกรองเมมเบรนมีความเพิ่มขึ้นด้วย และอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันขับของเมมเบรนเพิ่มขึ้น ด้วย ทำให้อนุภาคชั้นเล็กหรือการอุดตันอัดตัวแน่นมากขึ้น ค่าเพอมีเอทจึงลดลง (Zokaee et al., 1999) ส่งผลให้ที่สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 75:25 เกิดการอุดตันได้เร็วกว่าที่สัดส่วน เพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 50:50 ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งการลดลงของฟลักซ์ที่รวดเร็ว แสดงถึงการ สะสมของอนุภาคแบ็ง โมดิฟายด์ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งส่งผลต่อระบบการกรองอัลตรา ฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แบ็ง โมดิฟายด์ ดังการศึกษาของ Hartono and Wenten (2005) ทำการศึกษา การแยกแบ็งจากกระบวนการไฮโดรไลสด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยพบว่า ค่าฟลักซ์ ลดลงอย่างรวดเร็ว ภายใน 2 ชั่วโมงในการเริ่มต้นเดินระบบ หลังจากนั้นฟลักซ์จะลดลงน้อยมาก จน ระบบดำเนินยังดำเนินต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทั้งนี้ การสะสมในชั้นเล็กและการอุดตันใน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิในการดำเนินการกรอง ชนิดเมม

เบรนและสารป้อนอีกด้วย โดยได้รับการยืนยันจากการศึกษาของ Konieczny et al. (2009) ทำการศึกษาการกำจัดสารออกเทนิกในแม่น้ำ พบว่าการดูดซับของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชั่น ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารป้อน ชนิดของเมมเบรนและขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองเมมเบรน

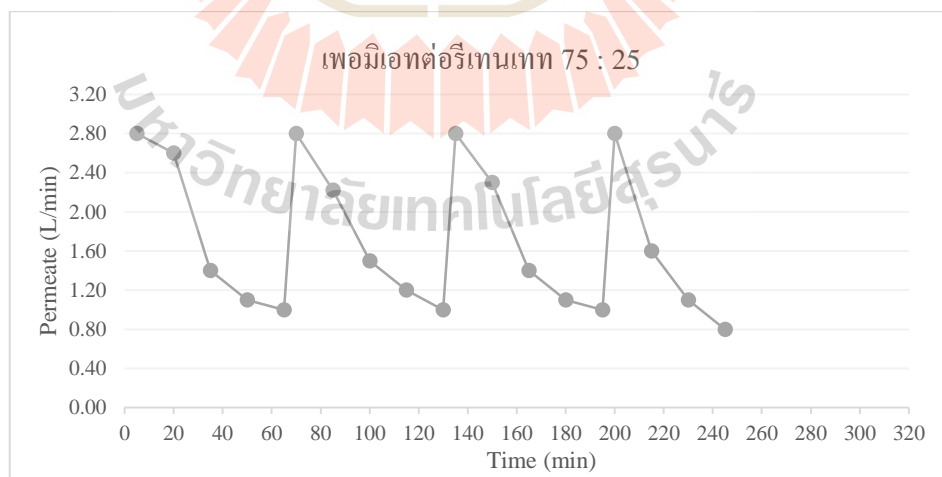
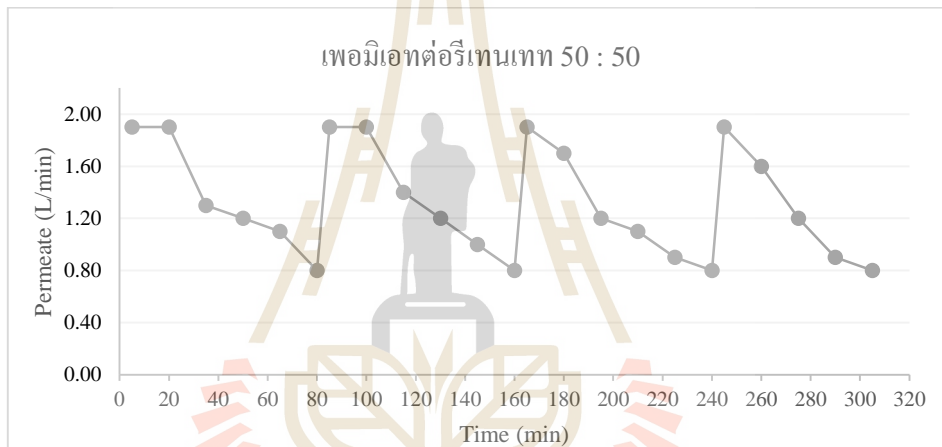
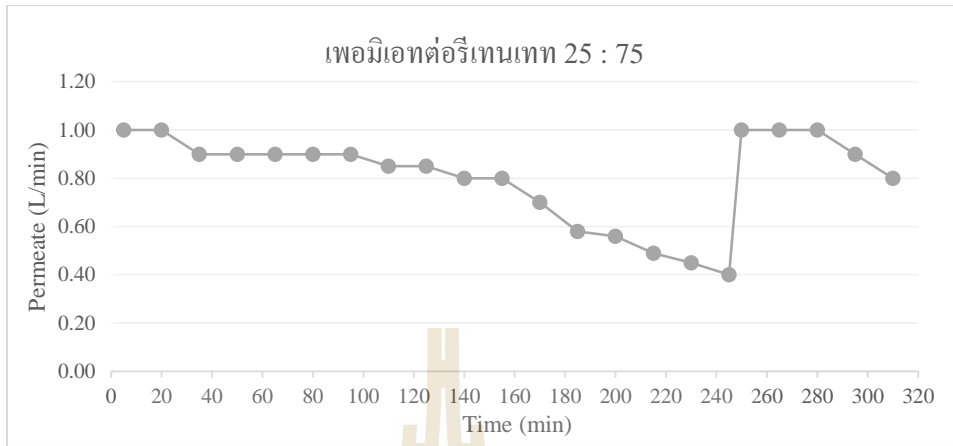
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทอ์รีเทนเทท พบว่า ที่สัดส่วน เท่ากับ 50:50 มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงสุด เท่ากับ 46.47% และแบ็ง โมดิฟายด์มีความสามารถในการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 1.32 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และที่สัดส่วนเพอมีเอทอ์รีเทนเทท เท่ากับ 25:75 และ 75:25 มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 42.35% และ 37.65% เมื่อนำข้อมูลไปทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ Paired T-Test พบว่า ทั้งสามข้อมูลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) และผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ดังตารางที่ 4.15 พบว่า ค่าพีเอช เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.79-7.14 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าพีเอชของน้ำประปา ก่อนเข้าสู่ระบบ โดยเกิดจากการหลุดของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของแบ็ง โมดิฟายด์ ดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ผลการศึกษานี้ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดและค่าซีไอดี พบว่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 561.86-882.74 mg/L และ 70.12-95.49 mg/L ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำตัวอย่างที่เข้าสู่ระบบ เนื่องจากแบ็งบางส่วนเกิดการละลายน้ำ ส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำและค่าซีไอดีเพิ่มสูงขึ้น และค่าความขุ่น เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.51-0.82 NTU

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแบ็ง โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชั่น

Permeate : Retentage	Hardness (meq/L)		Efficiency (%)	Adsorption capacity (eq/g)
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย		
25 : 75	1.70-2.30	2.00±0.07	41.18	1.17
50 : 50	1.60-2.20	1.82±0.13	46.47	1.32
75 : 25	2.20-2.35	2.12±0.10	37.65	1.07

ซึ่งผลการศึกษาจากการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทอ์รีเทนเทท พิจารณาจากปริมาณน้ำเพอมีเอทที่ได้ออก และประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาพร้อมด้วย สรุปได้ว่า ค่าสัดส่วนเพอมีเอทที่เหมาะสม คือ 50:50 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุด และ





รูปที่ 4.14 ผลของการแปรเปลี่ยนสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 50:50 และ 75:25

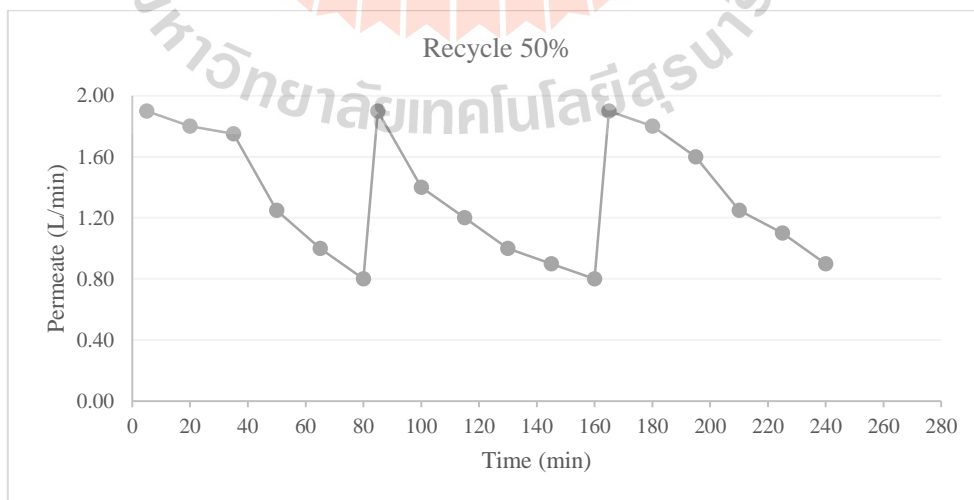
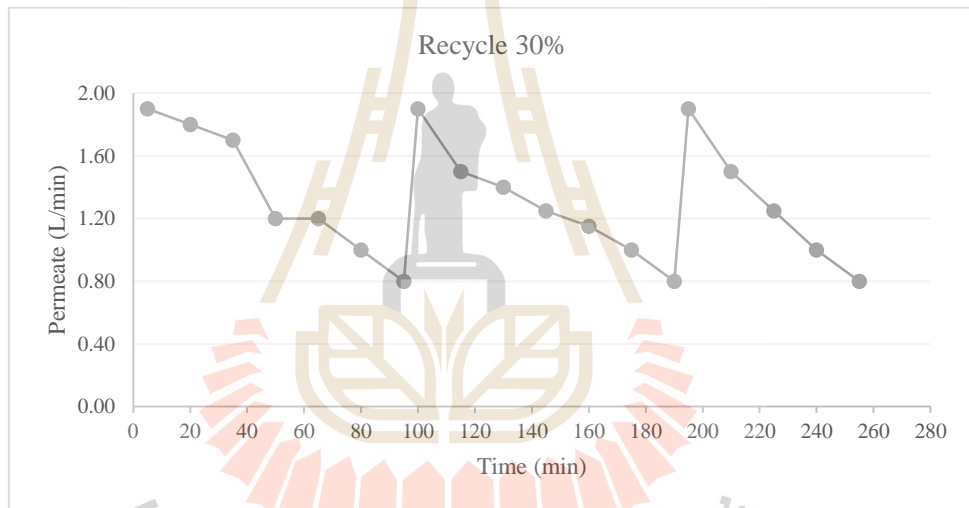
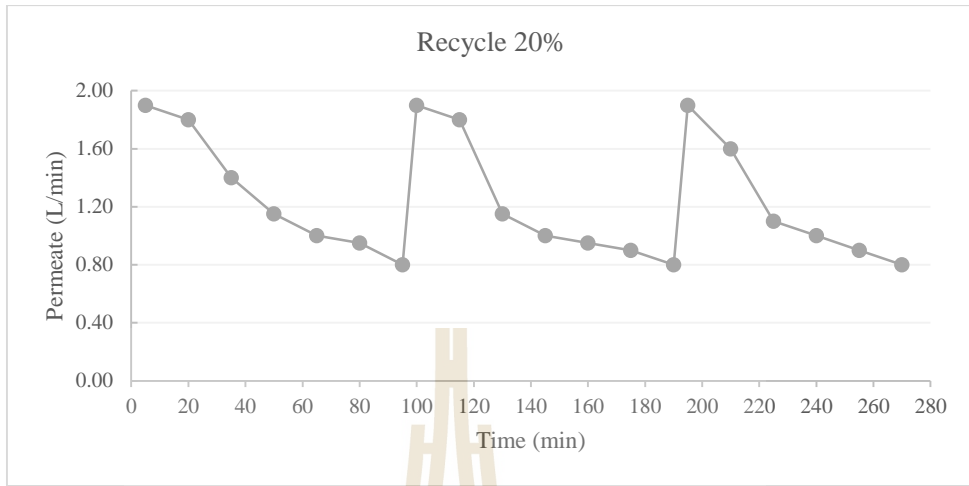
ได้ปริมาณน้ำเพอมีเอทที่มากกว่าสัดส่วน เท่ากับ 25:75 และแม้ว่าที่สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท เท่ากับ 75:25 จะได้ปริมาณน้ำเพอมีเอทที่มากกว่า แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างที่ น้อยกว่า และเกิดการอุดตันเร็วกว่าที่สัดส่วน เท่ากับ 50:50 เนื่องจากแรงดันที่หน้าผิวเมมเบรนสูง กว่า ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททที่เหมาะสม เท่ากับ 50:50 เพื่อใช้ใน การศึกษาการหมุนเวียนวัสดุคูดซับ ในการศึกษาหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.15 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แป้งโมดิฟายด์

Permeate : Retentage	pH		TDS (mg/L)		COD (mg/L)		Turbidity (NTU)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
25 : 75	7.00-7.23	7.14±0.07	322-686	561.86±76.18	66.61-95.16	82.04±9.85	0.32-0.72	0.51±0.11
50 : 50	6.78-6.96	6.84±0.05	657-943	785.43±77.36	48.00-96.00	70.12±11.78	0.37-0.97	0.64±0.17
75 : 25	6.65-6.92	6.79±0.09	761-1,067	882.74±100.50	57.60-115.20	95.49±18.55	0.34-1.30	0.82±0.35

#### 4.11 ผลกระทบการหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับมาใช้งาน

ทำการศึกษาระบบหมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 20 30 และ 50% ของน้ำรีเทนเททกลับเข้ามา ในระบบอีกครั้ง ผลการศึกษาพบว่า การหมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 20% และ 30% มีระยะเวลา การอุดตันช้ากว่าที่การหมุนเวียนวัสดุคูดซับที่ 50% โดยพิจารณาจากเพอมีเอทที่ลดลง 60% ของ เพอมีเอทเริ่มต้นการเดินระบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาในการอุดตันเมมเบรนจาก การศึกษานี้และการศึกษาในหัวข้อ 4.10 ในระบบที่มีการหมุนเวียนวัสดุคูดซับและไม่มีการ หมุนเวียนวัสดุคูดซับ พบว่า การหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับมาเข้ามาในระบบ ส่งผลให้ความเร็วของ สารที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทำให้เกิดการพาและลากอนุภาคของ แป้งโมดิฟายด์ให้เคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ เนื่องจากเกิดแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนและผิวอนุภาค จึงลดการสะสมของอนุภาคแป้งที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้ ดังนั้น ระบบที่มีการหมุนเวียนวัสดุคูด ซับ จึงมีระยะเวลาการอุดตันช้ากว่า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับมาที่ระบบ มากเกินไป จะส่งผลให้ความเข้มข้นของวัสดุคูดซับเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าเพอมีเอทลดลง เนื่องจากการ เกิดการสะสมของอนุภาคหรือชั้นเค้กที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้น (Kilduff et al., 2004) ที่การ หมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 50% จึงเกิดการอุดตันได้เร็วกว่า ที่ 20% และ 30% ดังรูปที่ 4.15 ซึ่ง สอดคล้องกับแรงดันผ่านพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ลดลงเช่นกัน โดยแสดงให้เห็นว่า แรงดันและ เพอมีเอทที่ลดลง เนื่องมาจากระบบเมมเบรนเกิดการอุดตันสูงขึ้น (Hortono and Wenten, 2005)



รูปที่ 4.15 ผลของการหมุนเวียนวัสดุดูดซับ 20 30 และ 50%

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า การหมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 20% มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง 48.24% และมีความสามารถในการกำจัดความกระด้าง 1.37 eq/g ดังแสดงในตารางที่ 4.16 โดยการหมุนเวียน เท่ากับ 30% และ 50% มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 44.12% และ 41.76% ตามลำดับ เมื่อวัสดุคูดซับในระบบเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในระบบไม่ได้ลดลง เนื่องจาก การเกิดการสะสมที่ชั้นเจลของผิวหน้าเมมเบรนของแป้ง โมดิฟายด์ ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแป้ง โมดิฟายด์และไอออนในน้ำต่ำ (Baharuddin et al, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Baek et al. (2007) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมตไม่ได้ลดลง แม้ว่าความเข้มข้นของแป้งประจุบวกในน้ำรีเทนเททจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม และสอดคล้องกับการศึกษาของ Baharuddin et al. (2015) ทำการศึกษาการกำจัด Zn (II) และ Pb(II) ด้วยพอลิเมอร์ร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยพบว่า เมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัด โลหะหนักลดลง และเมื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ดังตารางที่ 4.17 พบว่า ค่าพีเอช มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.93-6.94 ส่วนค่าของแข็งละลายน้ำและค่าซีโอดี เฉลี่ยอยู่ในช่วง 511.75-802.22 mg/L และ 52.30-83.11 mg/L ตามลำดับ และค่าความขุ่น เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.26-0.73 NTU ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาการดูดตันของเมมเบรน โดยการหมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 20% มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงสุด และเกิดการดูดตันได้ช้า รวมทั้งค่าของแข็งละลายและค่าซีโอดีน้อยกว่าที่การหมุนเวียน 30% และ 50% เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Paired T-Test พบว่า ค่าซีโอดี ค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าความขุ่น และประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p$ -value < 0.05) ส่วนค่าพีเอช ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p$ -value > 0.05) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกการหมุนเวียนวัสดุคูดซับที่เหมาะสม เท่ากับ 20% ของน้ำรีเทนเทท เพื่อใช้ในการศึกษาถัดไป

และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนวัสดุคูดซับในการศึกษาที่ผ่านมา และการหมุนเวียนวัสดุคูดซับที่ 20% โดยทั้งสอง การศึกษามีความสามารถในการกำจัดความกระด้างใกล้เคียงกัน คือ 1.32 eq/g และ 1.37 eq/g ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลไปทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ Paired T-Test พบว่า ทั้งสองข้อมูล แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p$ -value < 0.05) อีกทั้งการหมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 20% สามารถยืดระยะเวลาการดูดตันของเมมเบรนได้นานขึ้น เนื่องจาก การหมุนเวียนวัสดุคูดซับ ส่งผล

ให้ระบบมีอัตราการไหลที่สูงขึ้น แรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนมีมากขึ้น ลดการสะสมของแบงก์ที่ผิวของเมมเบรนได้ดี (Wenten, 1999) ส่งผลให้ระบบที่มีการหมุนเวียนวัสดุคูดซับ เท่ากับ 20% ยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนได้ยาวนานกว่าระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนวัสดุคูดซับ

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยแบงก์โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

Recycle (%)	Hardness (meq/L)		Efficiency (%)	Adsorption capacity (eq/g)
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย		
20	1.60-1.90	1.76±0.09	48.24	1.37
30	1.80-2.10	1.90±0.10	44.12	1.25
50	1.70-2.10	1.98±0.12	41.76	1.18

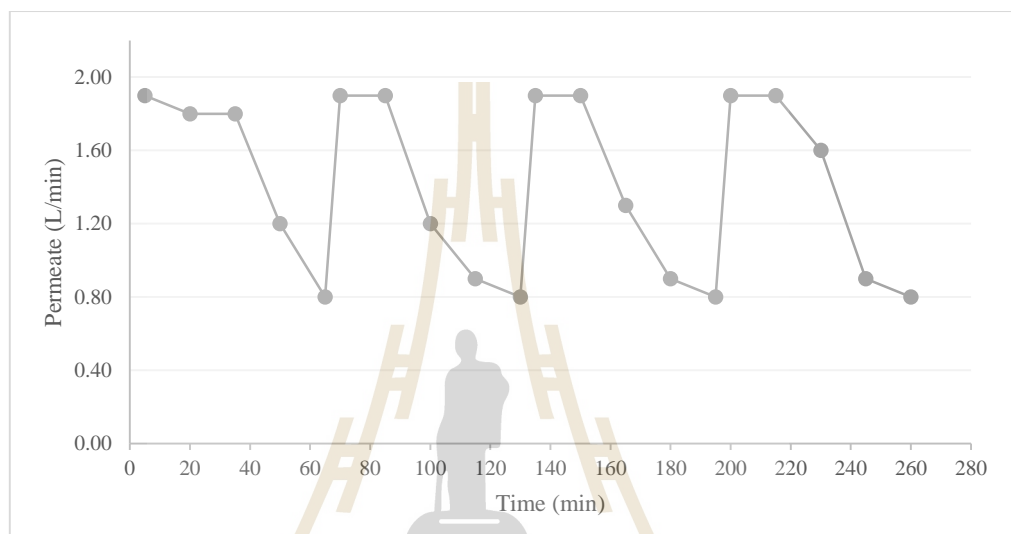
ตารางที่ 4.17 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แบงก์โมดิฟายด์

Recycle (%)	pH		TDS (mg/L)		COD (mg/L)		Turbidity (NTU)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
20	6.82-7.05	6.93±0.07	225-655	511.75±113	33.74-89.98	52.30±17.53	0.16-1.08	0.38±0.24
30	6.80-7.08	6.94±0.07	275-745	523.68±120	56.24-89.98	75.78±8.82	0.14-1.05	0.26±0.20
50	6.88-7.03	6.93±0.04	610-955	802.22±85.9	44.99-101.23	83.11±16.40	0.19-1.27	0.73±0.35

#### 4.12 ผลกระทบของสารก่อตะกอนต่อการอุดตันของเมมเบรน

การศึกษานี้เลือกใช้ PACl (Polyaluminum chloride) ที่ความเข้มข้น เท่ากับ 20 ppm ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีการหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับเข้ามาในระบบ เท่ากับ 20% ผลการศึกษพบว่า การใช้สารก่อตะกอนส่งผลให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้เร็วขึ้น โดยเพอมีเอทลดลง 60% ภายในระยะเวลา 65 นาที ดังรูปที่ 4.16 เนื่องจาก การหมุนเวียนวัสดุคูดซับกลับเข้ามาในระบบ ทำให้ความเข้มข้นของแบงก์โมดิฟายด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สารก่อตะกอน (PACl) เข้าไปจับกับโมเลกุลของแบงก์โมดิฟายด์ ทำให้โมเลกุลของแบงก์มีอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น (Peter, 2001) ซึ่งขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ เกิดการสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น และเกิดการอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนได้ ในโอกาสต่อมา ส่งผลให้ค่าเพอมีเอทลดลง (Cho et al., 2000) การเดินระบบร่วมกับการใช้สารก่อตะกอน จึงทำให้เกิดการอุดตันได้เร็วกว่าระบบที่ไม่มีการเติมสารก่อตะกอน แต่ในทางตรงกันข้าม

ในการศึกษาของ Xia et al. (2007) พบว่า ค่าฟลักซ์ของเมมเบรนค่อยๆลดลง เมื่อมีการเติมสาร Coagulant ลงในระบบ ก่อนนำน้ำส่วนใสเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งกระบวนการโคแอกกูเลชันจะช่วยกำจัดสารอแกนิคและช่วยลดการอุดตันของเมมเบรนได้อีกด้วย (Bouchard et al., 2001; Guigui et al., 2002)



รูปที่ 4.16 การลดลงของเพอมีเอท เมื่อมีการเติมสารก่อตะกอนและหมุนเวียนตัวดูดซับ 20%

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การเติมสารก่อตะกอนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างลดลงจาก 48.24% เหลือเพียง 43.55% และความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเบี่ยงโมดิไฟด์ มีค่าเท่ากับ 1.23 eq/g เนื่องจากสารก่อตะกอนส่งผลให้ขนาดโมเลกุลของเบี่ยงมีขนาดใหญ่ขึ้น และอาจส่งผลให้รูปแบบของโครงสร้างเบี่ยงเปลี่ยนไป ส่งผลให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเบี่ยงและไอออนในน้ำเกิดได้ลดลง (Bertolini, 2010; Aratani et al., 1983) ผลการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.19 พบว่า ค่าพีเอช เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.92 ค่าของแข็งละลายน้ำและซีโอดี เฉลี่ยอยู่ในช่วง 608.50 mg/L และ 55.12 mg/L ตามลำดับ และค่าความขุ่น เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.56 NTU

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของแข็ง โมดิฟายด์ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน

Conditions	Hardness (meq/L)		Efficiency (%)	Adsorption capacity (eq/g)
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย		
PACl 20 ppm	1.70-2.20	1.92±0.13	43.53	1.23

ตารางที่ 4.19 คุณภาพน้ำออก ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับการใช้แข็งโมดิฟายด์

Condition	pH		TDS (mg/L)		COD (mg/L)		Turbidity (NTU)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
PACl 20 ppm	6.82-7.04	6.92±0.06	440-690	608.50±72.41	33.74-67.49	55.12±7.87	0.25-0.88	0.56±0.21

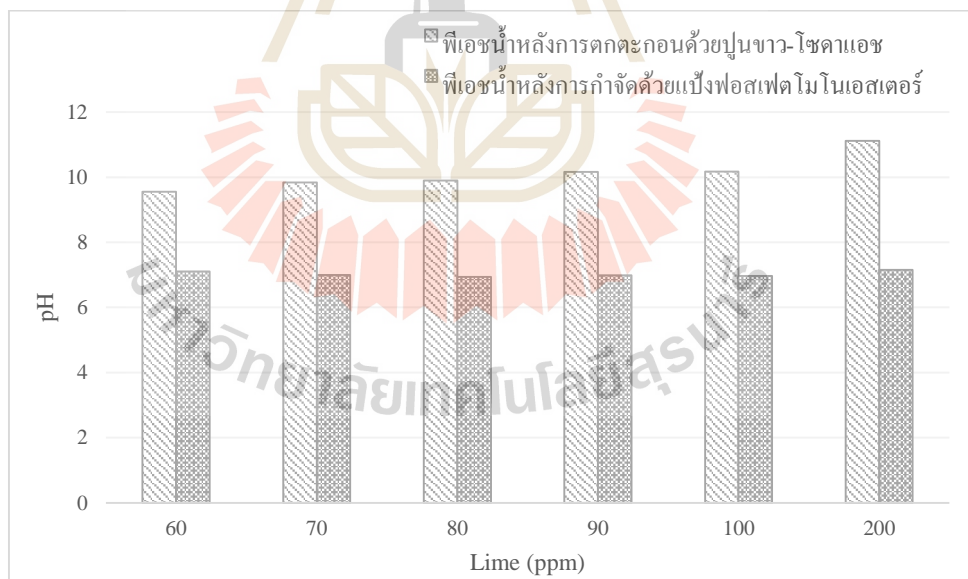
### ส่วนที่ 3: ผลกระทบการกำจัดความกระด้างร่วมกับปูนขาว-โซดาแอช

ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างด้วยแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอช โดยทำการศึกษา 2 ส่วน ได้แก่ (1) ศึกษาการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของปูนขาว และ (2) ศึกษาการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ โดยผลการศึกษาดังนี้

#### 4.13 การหาปริมาณปูนขาว-โซดาแอชที่เหมาะสม

การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของปูนขาว 60-200 ppm และ โซดาแอช 40 ppm ร่วมกับการใช้แข็งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ 2.0 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 200 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที พบว่าคุณภาพน้ำหลังการตกตะกอนด้วยกระบวนการปูนขาว – โซดาแอช เมื่อใช้ความเข้มข้นของปูนขาวที่เพิ่มขึ้น ค่าความกระด้างทั้งหมดมีค่าลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นปูนขาว เท่ากับ 80 ppm มีประสิทธิภาพในการลดค่าความกระด้างทั้งหมดจาก 103.89 mg/L as CaCO<sub>3</sub> เหลือ 68.00 mg/L as CaCO<sub>3</sub> หลังจากนั้นนำน้ำตัวอย่างมากำจัดความกระด้างต่อโดยการใช้แข็งโมดิฟายด์ พบว่า สามารถลดค่าความกระด้างทั้งหมดต่อจากกระบวนการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอชเหลือเพียง 48.00 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งมีความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่เท่ากับ 44.00 mg/L as CaCO<sub>3</sub> และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่ 4.00

mg/L as CaCO<sub>3</sub> เมื่อความเข้มข้นของปูนขาวเพิ่มสูงขึ้น เท่ากับ 200 ppm คุณภาพน้ำหลังตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอช มีค่าความกระด้างทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ เนื่องจากการเติมปูนขาวในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้แคลเซียมไอออนรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน กลับมาอยู่ในรูปของสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH<sub>2</sub>) จึงทำให้ค่าความกระด้างของน้ำสูงขึ้น สำหรับคุณภาพหลังการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอช ค่าพีเอชของน้ำอยู่ในช่วง 9.55-11.12 เมื่อกำจัดด้วยเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ พบว่า ค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 6.94-7.15 ดังรูปที่ 4.18 เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของเบี่ยงโมดิฟายด์เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อยู่ในน้ำ และปล่อยโปรตอนออกมาจากโครงสร้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของ polydentate ligands จะเสถียรและแข็งแรงมากกว่าการเกิด monodentate ligands (Wang et al., 2011) ปริมาณของโปรตอนที่ปล่อยออกมา จึงทำให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งจากการศึกษาี้ เลือกความเข้มข้นปูนขาว เท่ากับ 80 ppm ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ในการลดค่าความกระด้างในน้ำประปราร่วมกับการใช้เบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ในการศึกษาถัดไป

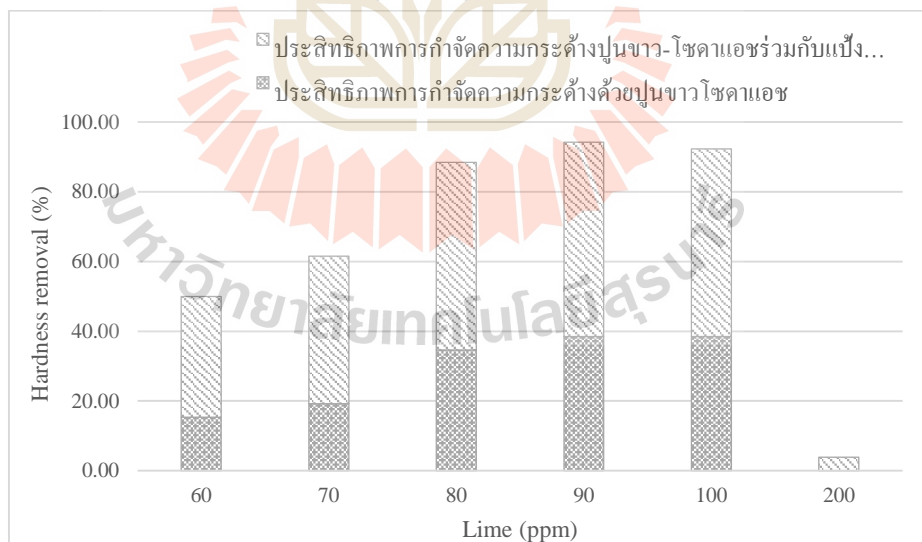


รูปที่ 4.17 ความกระด้างทั้งหมดหลังการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอชร่วมกับการใช้เบี่ยงโมดิฟายด์



ความเข้มข้นสารเคมี		ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังตกตะกอน		ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์				Total Removal Efficiency (%)
Ca(OH) <sub>2</sub> (ppm)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ppm)	pH	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	pH	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Calcium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Magnesium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	
60	40	9.55	88	7.10	68	60	8	34.62
70	40	9.84	84	7.00	60	56	4	42.31
80	40	9.90	68	6.94	48	44	4	53.85
90	40	10.16	64	6.99	46	44	2	55.77
100	40	10.17	64	6.97	48	0	48	53.85
200	40	11.12	120	7.15	100	82	18	3.85

ตารางที่ 4.20 คุณภาพน้ำหลังกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว-โซดาแอช และเบี่ยงโมดิฟายด์



รูปที่ 4.18 ค่าฟิเอชของน้ำหลังการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอชร่วมกับการใช้เบี่ยงโมดิฟายด์

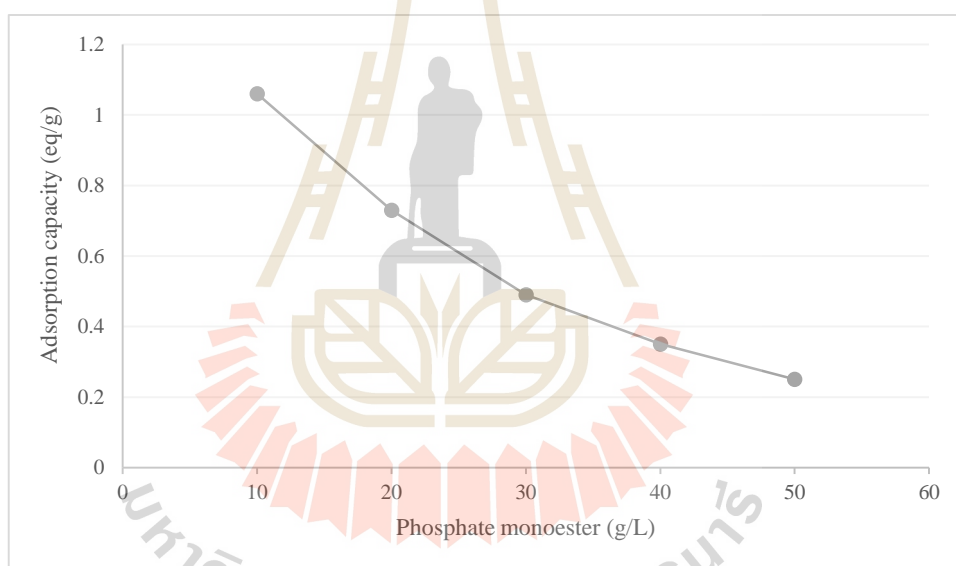
#### 4.14 ผลกระทบของความเข้มข้นของเบี่ยงโมดิฟายด์ในกระบวนการปูนขาว-โซดาแอส

ศึกษากระบวนการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอส ที่ความเข้มข้นปูนขาว 80 mg/L และ โซดาแอส 40 mg/L โดยคุณภาพน้ำหลังตกตะกอนด้วยปูนขาว โซดาแอส มีค่าความกระด้างเหลืออยู่ที่ 70.40 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ดังแสดงในตารางที่ 4.21 โดยปูนขาวและโซดาแอส มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างเท่ากับ 32.30% เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ที่ 10-50 g/L พบว่า ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์มีค่าลดลง เนื่องจาก พื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์กับแคลเซียมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ เกิดการสัมผัสกันได้ไม่ทั่วถึง ทำให้ความสามารถในการกำจัดความกระด้างลดลง (Chen and Wang, 2006; โกวิทช์ และคณะ, 2008) ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งสัมพันธ์กับการศึกษาการแปรเปลี่ยนปริมาณเบี่ยงฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ในการศึกษาที่ผ่านมา เมื่อเพิ่มปริมาณเบี่ยงสูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดความกระด้างลดลง เมื่อทำการวิเคราะห์สภาพด่าง (Total Alkalinity) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเบี่ยงโมดิฟายด์เพิ่มขึ้น สภาพด่างมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 120.00-350.70 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความกระด้างทั้งหมดที่เหลือ (Total Hardness) แสดงให้เห็นว่า ในน้ำประปาไม่มีค่าความกระด้างถาวรเหลืออยู่เลย แต่จะเหลืออยู่ในรูปของความกระด้างชั่วคราวเท่านั้น และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชหลังการกำจัดด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ร่วมด้วย พบว่า มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.70-7.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปของสภาพด่างในน้ำเหลืออยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) เป็นส่วนใหญ่

เมื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ของน้ำหลังการกำจัดด้วยเบี่ยงโมดิฟายด์ร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว พบว่า มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 0.33-2.02 NTU ค่าของแข็งละลายน้ำ อยู่ในช่วง 387.67-1228.33 mg/L ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปา (WHO., 2011) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของเบี่ยงโมดิฟายด์ 20 g/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาได้เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 60.29% ดังแสดงในตารางที่ 4.22 เมื่อใช้ร่วมกับปูนขาวความเข้มข้น 80 ppm และ โซดาแอสความเข้มข้น 40 ppm

ตารางที่ 4.21 คุณภาพน้ำหลังตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอช

ความเข้มข้นสารเคมี		คุณภาพน้ำหลังตกตะกอน				
Ca(OH) <sub>2</sub> (ppm)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ppm)	pH	Total Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Total Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Calcium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Magnesium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )
80	40	10.40	70.40	51.20	41.60	28.80



รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับของแป้งโมดิไฟด์ ความเข้มข้น 10-50 g/L

ความเข้มข้นของเบิ้ง (g/L)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยเบิ้งโมดิฟายด์						Total Removal Efficiency (%)
	Total Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Total Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	pH	ความขุ่น (NTU)	TDS (mg/L)	Absorption capacity (eq/g)	
10	120.0	49.3	7.21	0.33	387.67	1.06	52.60
20	160.0	41.3	6.87	0.65	584.33	0.73	60.29
30	220.0	41.3	6.77	0.91	828.67	0.49	60.29
40	277.3	42.6	6.74	1.34	1,065.67	0.35	59.04
50	350.7	45.3	6.74	2.02	1,228.33	0.25	56.44

ตารางที่ 4.22 คุณภาพน้ำหลังกำจัดด้วยเบิ้ง โมดิฟายด์



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาแนวทางในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปาโดยใช้แบริงโมดิฟายด์ร่วมกับ การเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

#### (1) การศึกษาในชุดทดลองแบบกะ (Batch Experiments)

จากการศึกษาหุ่มฟังก์ชันของแบริงโมดิฟายด์ที่มีผลต่อการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา พบว่า แบริงฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้ดีที่สุด ตามด้วย แบริงอะซิทีเลทออกซิไดซ์ และแบริงโซเดียม ออกเทนิลซัคซิเนต โดยแนวโน้มกลไกการกำจัดความ กระด้างของแบริงโมดิฟายด์ทั้งสามชนิด อาจเกิดจากการเข้าแทนที่ของแคลเซียมและแมกนีเซียม ไอออนในตำแหน่งของหุ่มฟังก์ชันของแบริงโมดิฟายด์ หรืออาจเกิดจากการแทนที่ในตำแหน่งไฮดรอกซิลในหน่วยของกลูโคสของแบริง และประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของแบริงโมดิฟายด์ ยังขึ้นอยู่กับค่าการแทนที่หุ่มฟังก์ชัน (DS) ของแบริงโมดิฟายด์อีกด้วย หลังจากนั้นนำแบริงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์มาทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม โดยพบว่า แบริง ฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์สามารถลดค่าความกระด้างในน้ำประปาจาก 103.89 mg/L asCaCO<sub>3</sub> เหลือ เท่ากับ 76.00 mg/L asCaCO<sub>3</sub> โดยมีความสามารถในการกำจัดความกระด้าง เท่ากับ 1.40 eq/g ที่ ระยะเวลาสัมผัสที่ 5 นาที และความเข้มข้นแบริงที่เหมาะสม เท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร โดยมีกลไกในการกำจัดความกระด้างด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม และไอโซเทอร์มการดูดซับ แบบฟรุนดิช แนวโน้มการดูดซับอาจเนื่องจาก เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียมและ แมกนีเซียมกับหุ่มฟังก์ชันของแบริง ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี (chemisorption) โดยพลังงานในการ เกิดพันธะแต่ละบริเวณจะไม่เท่ากัน จากผลการศึกษา ระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงขึ้นด้วย เนื่องจาก แบริงโมดิฟายด์ สามารถทำปฏิกิริยากับ ไอออนแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำได้มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีการใช้ปริมาณแบริง โมดิฟายด์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การกำจัดความกระด้างลดลง เนื่องจาก ปริมาณแบริงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้

พื้นที่ผิวในการสัมผัสของแข็ง โมดิฟายด์กับไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมน้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างลดลงด้วย

(2) การศึกษาการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา ร่วมกับการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ระบบอัลตราฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพที่ดีในการแยกโมเลกุลของแข็งออกจากน้ำ โดยสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่  $25 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$  และสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 50:50 โดยระยะเวลาที่เมมเบรนเริ่มอุดตัน ประมาณ 80 นาที ซึ่งสังเกตได้จากค่าเพอมีเอทฟลักซ์ลดลง 60% จึงทำการล้างเมมเบรนด้วยน้ำสะอาด และทำการล้างย้อนเป็นเวลา 2 นาที โดยการอุดตันของเมมเบรนเกิดจากอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก เกิดการอุดตันบริเวณผิวของเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้เกิดการอุดตันแบบคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน และอาจเกิดการอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนได้ในระยะเวลาต่อมา และเมื่อมีการหมุนเวียนตัวดูดซับในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าเพอมีเอทลดลง เนื่องจากการเกิดการสะสมของอนุภาคหรือชั้นเก็ทที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้น และการเติมสารก่อตะกอน โพลีอลูมินัมคลอไรด์ ส่งผลให้ระบบเกิดการอุดตันได้เร็วขึ้น โดยสารก่อตะกอนจะจับกับอนุภาคของเม็ดแข็ง ทำให้มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น จึงเกิดการสะสมที่บริเวณผิวของเมมเบรนและเกิดอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนในลำดับต่อมา

(3) ผลกระทบการกำจัดความกระด้างร่วมกับปูนขาว-โซดาแอช

เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างร่วมกับการใช้ปูนขาว-โซดาแอช พบว่า การใช้ปูนขาว 80 ppm โซดาแอช 40 ppm ร่วมกับเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์ความเข้มข้น  $20 \text{ g/L}$  สามารถกำจัดความกระด้างให้ลดลงเหลือ  $41.30 \text{ mg/L as CaCO}_3$  โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงสุด 60.29% แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์มีค่าลดลง เนื่องจาก พื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างเบี่ยงฟอสเฟต โมโนเอสเตอร์กับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำ เกิดการสัมผัสกันได้ไม่ทั่วถึง จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดความกระด้างลดลง

## รายการอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2558). รายงานสถานการณ์น้ำบาดาล ประเทศไทย พ.ศ. 2558.
- กรมอนามัย. (2553). ประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปา พ.ศ. 2553.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2536). วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2541). วิศวกรรมประปา. พิมพ์ครั้งที่ 4.
- โกวิทย์ ปิยะมั่งคณา, จารุวรรณ ตามพัวรัตน์, ปิยะวัฒน์ โพธิ์มงคลกุล และฉัตรส คงสมภักดิ์. (2551) จด พลศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 8(1), 68-79.
- จตุพร วิทยาคูณ และ นุรักษ์ กฤษดาบุรุษ. 2547. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐาน และ การประยุกต์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จริยา ยี่มรัตน์บวร (2555). การประเมินคุณภาพน้ำในระบบประปาชุมชน. รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช, ฐิตาพร คำภู, นันทกานต์ ทองเฟื่อง, สุจิตรา แก้วศิริ, อธิศักดิ์ เภาโพธิ์, ไท แสงเทียน และ พุทธพร แสงเทียน. (2560). การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบบสี 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ฐปณีย์ ฤทธิ์ไพโรจน์, วิโรจน์ ยูรวงศ์ และ พิภูต วนิชากิชาติ. (2549). พลั๊กซ์ การกักกัน และฟาวลิงระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันน้ำบาดาลโดนดในระดับโรงงานทดลอง. วารสารวิชาการสงขลานครินทร์ ปีที่ 28.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิธิศ นามซาร, ปานใจ สี่ประเสริฐสุทธิ และ ธาตุกร พระบำรุง. (2560). การดูดซับนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) โดย แกลบและแกลบที่ปรับสภาพ. J Sci Technol MSU vol 37.

ชนกฤต พรหมทอง (2551). การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ชนาวัฒน์ รักกมล, ปุณณพัฒน์ ไชยเมล์ และ สมเกียรติยศ วรเดช. (2551). การประเมินประสิทธิภาพและคุณภาพน้ำของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน. มหาวิทยาลัยทักษิณ.

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 (พ.ศ.2524) เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2549) เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน

ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2553) เรื่อง กำหนดประเภทหรือชนิดของโรงงานที่ต้องจัดทำรายงานชนิดและปริมาณสารมลพิษที่ระบายออกจากโรงงาน พลากร บุญใส. (2558). ไอโซโทมการดูดซับ ฟีนอลโดย ซีโอไลต์ ชนิด SUZ-4 ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ฉบับพิเศษจากงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

ไพศาล วีรกิจ. (2549). การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : เอ็มแอนด์อี มั่นสิน ดัชนีกุลเวศน์. (2550). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยุภาพร อำนวย, นันทพร สุทธิประภา, และ วัฒนาชัย มาลัย. (2557). การประเมินประสิทธิภาพระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

รัฐพล เจียววิริยะบุญญา. (2552). การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบการผลิตน้ำประปา. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัตนา จิระรัตนานนท์. (2543). กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ไทยเส็ง

สัญญา สราภิรมย์ และ อัครพร อัครราช. (2548). น้ำบาดาล. รายงานเสนอต่อโครงการแผนที่ภูมิทัศน์ภาคใต้: ฐานเศรษฐกิจและทุนทางวัฒนธรรม. โครงการภายใต้เงินสนับสนุนจาก สกว.

สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป.

อมรรัตน์ วงษ์กลม. (2014). บทควมวิจัยการกำจัดค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี.



- Allen, L.C., and Knight, E.T. (1992). Electronagativity: Why has it been so difficult to define. **J. Mole Struct: Theochem.** 261: 313-330.
- Anwar, K.M., and Aggarwal, V. (2014). Analysis of Groundwater Quality of Aligarh City, (India): Using Water Quality Index. **Curr World Environ.** 9(3).
- Apell, J.N., and Boyer, T.H. (2010). Combined ion exchange treatment for removal of dissolved organic matter and hardness. **Journal of water research.** 44: 2419–2430.
- APHA, AWWA, WPCF. (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20<sup>th</sup> ed. Washington DC. USA. ISBN 0–87553–235–7.
- Aratani, T., Kodukula, P., and Patterson, J.W. (1983). Removal of metals in combined treatment systems. **United States Environmental Protection Agency Report.** Illinois Institute of Technology Chicago. Illinois.
- Arias-Paic, M., Cawley, K.M., Byg, S., Rosario-Ortiz, F.L. (2015). Enhanced DOC Removal Using Anion and Cation Ion Exchange Resins. **Water Res.** 88: 981-989
- Arslan, M. (2010). Preparation and use of amine-functionalized glycidyl methacrylate-g-poly(ethylene terephthalate) fibers for removal of chromium(VI) from aqueous solution. **Fibers and Polymers.** 11: 325-330.
- Bade, R., Lee, S.H., Jo, S., Lee, H.S., and Lee, S.E. (2008). Micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) and activated carbon fibre (ACF) hybrid processes for chromate removal from wastewater. **Desalination.** 264-278.
- Baek, K., Yang, J.X., Kwon, T.S., and Yang, J.W. (2007). Cationic starch-enhanced ultrafiltration for Cr(VI) removal. **Desalination.** 206: 245–250.
- Baharuddin, N.H., Sulaiman, N.M.N., and Aroua, M.K. (2015). Removal of zinc and lead ions by polymer-enhanced ultrafiltration using unmodified starch as novel binding polymer. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 12: 1825–1834.
- Baker, R. W. (2000). Membrane technology and applications. **United States of America: McGraw-Hill.**
- Bergamasco, R., Konradt-Moraesa, L. C., and Vieira, M. F. (2011). Performance of a coagulation– ultrafiltration hybrid process for water supply treatment. **Chemical Engineering Journal.** 166: 483–489

- Bergman, R.A. (1995). Membrane softening versus lime softening in Florida: A cost comparison update. **Desalination**. 102: 11-24.
- Bertolini, A.C. (2010). Starches: Characterization, Properties, and Applications. **CRC Press**. United States of America.
- Bouchard, C., Laflamme, E., Serodes, J.B., Ellis, D., Rahni, M., and Rodriguez, M. (2001). Étude en la laboratoire de l'ultrafiltration et de la coagulation–ultrafiltration d'une eau colorée 17ième Symposium de l'Est du Canada sur la Recherche Portant sur la Pollution de l'eau 2. 139-148.
- Bourgeois, K.N., Jeannie, L., Darby, M., and Tchobanoglous, G. (2001). Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness. **Wat. Res.** 35(1): 77-90.
- Boyd, C.C., and Duranceau, S.J. (2012). Assessing and maintaining membrane performance in a post-sedimentation ultrafiltration process. **IWA Publishing**. 7(2)
- Bruggen B. V., Everaert, K., Wilms, D., and Vandecasteele, C. (2001). Application of nanofiltration for removal of pesticides, nitrate and hardness from ground water: rejection properties and economic evaluation. **Journal of membrane science**. 193: 239-248.
- Bruggen B. V., Goossens, H., Everard, P. A., Stengée, K., and Rogge, W. (2009). Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. **Journal of Environmental Management**. 91(2): 541-549.
- Cameron, B.A. (2011). Detergent Considerations for Consumers: Laundering in Hard Water-How Much Extra Detergent Is Required. Retrieved from: [https://www.joe.org/joe/2011august/pdf/JOE\\_v49\\_4rb6.pdf](https://www.joe.org/joe/2011august/pdf/JOE_v49_4rb6.pdf)
- Chabot, J.F., and Hood, L.F. (1976). Interaction of iron compounds with starch granules. **Wiley**. New York. 264–267.
- Chen, Y., and Wang, G. (2006). Synthesis of Crosslinked Oxidized Starch and Its Adsorption Behavior for Calcium Ion. **Journal of Applied Polymer Science**. 102: 1539–1546.
- 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.

- Cheryan, M. (1986). Ultrafiltration and microfiltration Handbook 2<sup>nd</sup> edition. **Technomic publish Co.** Lancaster. USA.
- Chiu, H.M., Tsai, S.S., Wu, T.N., and Yang, C.Y. (2010). Effect modification of the association between trihalomethanes and pancreatic cancer by drinking water hardness: Evidence from an ecological study. **Environmental Research**. 110(5): 513-518
- Cho, G., Amy G., and Pellegrino, J. (2000). Membrane filtration of natural organic matter: comparison of flux decline, NOM rejection, and foulants during filtration with three UF membranes, *Desalination*. 127: 283–298.
- Chou, A., Eggers, P., Paddon-Row, M. and Gooding, J. (2009). Self-assembled carbon nanotube electrode arrays: effect of length of the linker between nanotubes and electrode, **The Journal of Physical Chemistry C**. 113(8): 3203–3211.
- Comstock, S.E.H., and Boyer, T.H. (2014). Combined magnetic ion exchange and cation exchange for removal of DOC and hardness. **Chemical Engineering Journal**. 241: 366–375.
- Crini, G. (2005). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. **Progress in Polymer Science**. 30: 38-70.
- Cuda, P., Pospisil, P., and Tenglerová, J. (2006). Reverse osmosis in water treatment for boilers. **Desalination**. 198: 41–46.
- Doulia, D., Leodopoulos, Ch., Gimouhopoulos, K., and Rigas, F. (2009). Adsorption of humic acid on acid-activated Greek bentonite. **Journal of Colloid and Interface Science**. 340: 131–141.
- Deng, S., and Ting Y.P. (2005). Fungal Biomass with Grafted Poly(acrylic acid) for Enhancement of Cu(II) and Cd(II) Biosorption. **Langmuir**. 21: 5940-5948.
- Deavenport, S.E.H., Boyer, T.H., and Graf, K.C. (2013). Treatment of nanofiltration and reverse osmosis concentrates: Systematic study of coagulation, softening and anion exchange. **Membrane Technology Conference and Exposition 2013**. 610-623.
- Demessie, B.A. (2002). Ultrafiltration of partially degraded starch solution. ISBN 82-471-5487-0
- Dey, D., Herzog, A., and Srinivasan, V. (2007). Research of Chemical precipitation: Water Softening.

- Dogan, H., Abak, H., and Alkan, M. (2009). Adsorption of methylene blue onto hazelnut shell: Kinetics, mechanism and activation parameters. **J. Hazard. Mater.** 164(1): 172-181.
- Dong, A., Xie, J., Wang, 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: 448-454.
- Eilers, H. (1936). On high polymeric compounds, news: the strong construction structure. **About Dep Chem.** 69: 819-848.
- El-Hamshary, H., Fouda, M.G., Moydeen, M., El-Newehy, M.H., Al-Deyab, S.S., and Abdel-Megeed, A. (2014). Synthesis and Antibacterial of Carboxymethyl Starch- Grafted Poly(vinyl Imidazole) Against Some Plant Pathogens. **Int J Biol Macromol.** 72: 1466-1472.
- El-Sayed, G.O. (2010). Removal of Water Hardness by Adsorption on Peanut Hull. **Journal of International Environmental Application & Science.** 5(1): 47-55.
- Emomjomeh, MM., and Sivakumar M. (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. **J Environ Manag.** 90(5): 1663-1679.
- Escobar, C., Soto-Salazar, C., and Tiral, M.I. (2006). Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater. **J. Environ. Manage.** 81: 384-391
- Evangelou, V.P. (1998). Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and applications. New York: Willey, 221-223.
- Fahmi, M.R., Najib, N.W.A.Z., Ping, P.C., and Hamidin, N. (2011). Mechanism of Turbidity and Hardness Removal in Hard Water Sources by using Moringa oleifera. **Journal of Applied Sciences.** 11(16). 2947-2953.
- Falsanisi, D., Liberti, L., and Notarnicola, M. (2009). Ultrafiltration (UF) Pilot Plant for Municipal Wastewater Reuse in Agriculture: Impact of the Operation Mode on Process Performance. **Water.** 1: 872-885.
- Fathy, MM. (2015). Study the Adsorption of Ca (II) and Mg (II) on High Cross- Linked Polystyrene Divinyl Benzene Resin.
- Girard, B., and Fukumoto, LR. (2000). Membrane Processing of Fruit Juices and Beverages: A Review. **Critical Reviews in Biotechnology.** 20(2): 109-75.

- Glucina, K., Alvarez, A., and Laine, J.M. (2000). Assessment of an Integrated membrane System for Surface Water Treatment. **Desalination**. 132 (1-3): 73-82.
- Guigui, C., Rouch, J.C., Durand-Bourlier, L., Bonnelye, V., and Aptel P. (2002). Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/ UF process for drinking water production. **Desalination**. 147: 95-100.
- Guiza, S. (2017). Biosorption of heavy metal from aqueous solution using cellulosic waster orange peel. *Ecological Engineering*. 99: 134-140.
- Guo, L., Zhang, S.F., Ju, B.Z., Yang, J.Z., and Quan, X. (2006). Removal of Pb(II) from Aqueous Solution by Cross-linked Starch Phosphate Carbamate. **Journal of Polymer Research**. 13: 213–217.
- Guo, X., Zhang, Z., Fang, L., Su. L. (2009). Study on ultrafiltration for surface water by a polyvinylchloride hollow fiber membrane. **Desalination**. 238: 183-191.
- Hartono, R., and Wenten, I.G. (2005). Clarification of cassava starch hydrolysate by crossflow ultrafiltration using polyacrylonitrile membrane. B. Novel Applications.
- Hassan, R., Arida, H., Fetyan, N. A. H., Abdel-Kader, A. H., and Montasser, M. (2014). Novel Treatment of Water Hardness from Ground Water Using Modified Chitosan. **International Journal of Advanced Scientific and Technical Research**. 4(2): 471-487.
- Heidekamp, A.J., and Lemley, A. T. (2005). Hard water (CCE Water Bulletin, 2005). Retrieved from: <http://waterquality.cce.cornell.edu/publications/CCEWQ-50-HardWater.pdf>
- Holt, P.K., Barton, G.W., and Mitchell, C.A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. **Chemosphere**. 59: 355-367.
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydr Polym**. 45(3): 253–267.
- Huang, Y., Du, J.R., Zhang, Y., Lawless, D., and Feng, X. (2015). Removal of mercury (II) from wastewater by polyvinylamine-enhanced ultrafiltration. **Separation and Purification Technology**. 154: 1–10.
- Jadhao, R.K., and Dawande, S.D. (2012). Reverse osmosis and ultrafiltration membrane for hospital wastewater treatment. **International Journal of Chemical Sciences and Applications**. 2(3): 283-288.

- Jiffirin, M. Y., Gupta, B. B., and Chaibi, A. (1993). Effect of physical parameters on the microfiltration of wine on a flat polymeric membrane. **Chem. Eng. And Proc.** 32: 379-387.
- Kandasamy, R., Mohamad, R., and Ismoen, M. (2016). Impact of chemical reaction on Cu, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SWCNTs–nanofluid flow under slip conditions. **Int. J. Eng. Sci. Technol.** 19(2): 700–709.
- Kannan, O., and Mani, N. (2014). Removal of hardness (Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>) and alkalinity from ground water by low cost adsorbent using Phyllanthus emblica wood. **International Journal of Chemical and Pharmaceutical Analysis.** 1(4). 208-212.
- Kannan, O., and Mani, N. (2015). Hardness (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) uptake from ground water by activated Phyllanthus emblica wood powder. **International Journal of Pharma Sciences and Research.** 6(2): 374-381.
- Kilduff, J.E., Mattaraj S., and Belfort, G. (2004). Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation. **J. Membrane Sci.** 239: 39–53.
- Kim, S. L., Chen, J. P., and Ting, Y. P. (2002). Study on Feed Pretreatment for Membrane Filtration of Secondary Effluent. **Separation and Purification Technology.** 171-179.
- Kim, B. S. and Lim, S. T. (1999). Removal of Heavy Metal Ions From Water by Cross-Linked Carboxymethyl Corn Starch. **Carbohydrate Polymers.** 39:217-223.
- Konieczny, K., D. Szałkol, D., Płonka, J., Rajca, M., and Bodzek, M. (2009). Coagulation–ultrafiltration system for river water treatment. *Desalination*, 240: 151-159.
- Konovalova, V., Guzikevich, K., Burban, A., Kujawski, W., Jarzynka, K., and Kujawa, J. (2016). Enhanced starch hydrolysis using  $\alpha$ -amylase immobilized on cellulose ultrafiltration affinity membrane. **Carbohydrate Polymers.**
- Korbutowicz, M.K. (2006). Removal of natural organic matter from water by in-line coagulation/ ultrafiltration process. **Desalination.** 200: 421-423.
- Kovasin, K. (2002). Modeling ultrafiltration and filtration phenomena applied in chemical pilping processes. **Chemical Engineering Report series.** 44: 1-52.

- Lazar, L., Bandrabur, B., Tataru-Farmus, R.E., Drobotă, M., Bulgariu, L., Gutt, G. (2014). Ftir analysis of ion exchange resins with application in permanent hard water softening. **Environmental Engineering and Management Journal**. 13(9): 2145-2152
- Lee, C.C. , and Lin, S.D. , **Handbook of environmental engineering calculation**. McGraw-Hill, New York, 1999. 1420-1423.
- Li, X. , Wang, C. , Qian, Y. , Wang, W. , and Zhang, L. (2013). Simultaneous removal of chemical oxygen demand, turbidity and hardness from biologically treated citric acid wastewater by electrochemical oxidation for reuse. **Separation and Purification Technology**. 107: 281–288.
- Liang, H. , Gong, W. , Chen, J. , and Li, G. (2008). Cleaning of fouled Ultrafiltration (UF) membrane by algae during reservoir water treatment. **Desalination**. 220: 267-172.
- Liu, J. , Hu, C. , and Huang, Q. (2019). Adsorption of Cu<sup>2+</sup>, and Cd<sup>2+</sup> onto oiltea shell from water. **Bioresource Technology**. 271: 487-491.
- Mahmoud, F., Abdel, M., Abdou, M.M., Abdel-Hameed, A.A., and El-Bellihi, A.E.A. (2015). Study the Adsorption of Ca (II) and Mg (II) on High CrossLinked Polystyrene Divinyl Benzene Resin. **Int j modern chem**. 7: 36-44.
- Malakootian, M., Mansoorian, H.J., and Moosazadeh, M. (2010). Performance evaluation of electrocoagulation process using iron- rod electrodes for removing hardness from drinking water. **Journal of Desalination**. 255: 67–71.
- Malakootian, M. and Yousefi, N. (2009). The Efficiency of Electrocoagulation Process Using Aluminum Electrodes in Removal of Hardness from Water, Iran. **J. Environ. Health Sci. Eng.** 6(2): 131-136.
- Mangaleshwaran, L., Thirulogachandar, A., Rajasekar, V. Muthukumaran, C., and Rasappan, K. (2015). Batch and fixed bed column studies on nickel (II) adsorption from aqueous solution by treated polyurethane foam. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 55: 112–118.
- Martinez, D.Z., and Pozuelo, E.C., (2011). Project for the development of innovative solutions for brines from desalination plants, Desalin. **Water Treat**. 31: 206–217.
- Meng, X., Sedman, J., Voort, F.R. (2012). Improving the Determination of Moisture in Edible Oils by FTIR Spectroscopy Using Acetonitrile Extraction. **Food Chem**. 135(2): 722-729.

- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater engineering : treatment and reuse*. Boston: McGraw-Hill.
- Mozia, S., and Tomaszewska, M. (2004). Treatment of surface water using hybrid processes adsorption on PAC and ultrafiltration. **Desalination**. 162: 23-31.
- Muhammad, K., Kusnandar, F., Hashim, D.M., and Rahman, R.A. (1999). Application of native and phosphorylated tapioca starches in potato starch noodle. **International Journal of Food Science and Technology**. 34: 275–280.
- Mustapha, S., Ndamitso, M.M., Mohammed, U.M., Adeosun, N.O., Idris, M., 2016. Study on activated from melon (*Citrullus lanatus*) husk as natural adsorbent for removal of hardness in water. **Adv. Anal. Chem**. 6(1): 1–9.
- Nasser, N.O.A., and Ali, A.A.M. (2006). Hardness removal from drinking water. **Journal of Engineering**. 405-413.
- Neubrand, W., Vogler, S., Ernst, M., and Jekel, M. (2010). Lab and pilot scale investigations on membrane fouling during the ultrafiltration of surface water. **Desalination**. 250: 968-972.
- Nik-Sulaiman, N.M., and Baharuddin, N.H. (2012). Removal of simultaneous multivalent metals ion via polymer enhanced ultrafiltration by using unmodified starch as water-based polymer. **Procedia engineering**. 44: 2002-2005.
- Nwabanne, J. T., and Igbokwe, P. K. (2012). Kinetic Modeling of Heavy Metals Adsorption on fixed bed Column. **International Journal of Environmental Research**. 6: 945-952.
- O'Connell DW, Birkinshaw C, O'Dwyer TF (2008) Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: a review. **Bioresour Technol**. 99: 6709–6724.
- Park, J.S., Song, J.H., Yeon, K.H., Moon, S.H., (2007). Removal of hardness ions from tap water using electro membrane processes, **Desalination**. 202: 1–8.
- Pentamwa, P., Thiphara, W., and Nuangon, S. (2011). Removal of Hardness from Groundwater by Synthetic Resin from Waste Plastics. **International Journal of Environmental Science and Development**. 2(6):479-483.
- Peter G. (2001). Using polyaluminium coagulant in water treatment. 64<sup>th</sup> Annual Water Industry Engineers and Operators' Conference. 40-47.



- Qasim, S. R., Motley, E.M. and Zhu, G., (2000), **Water Works Engineering**. Chiang, Patel and Yerby, Inc., Dallas, Texas.
- Qin, H., Si-ming, Z., Di, Z., and Shu-juan, Y. (2015). Kinetic and thermodynamic study of the adsorption of calcium onto sugar beet pulp. **Sugar Industry**. 565–570
- Racho, P., and Phalathip, P. (2014). Modified Starch–Enhanced Ultrafiltration for Chromium (VI) Removal. **Journal of Clean Energy Technologies**. 1(2):18-21.
- Randtke, S. and Hoeha, R., (1999). Removal of DBP precursors by enhanced coagulation and lime softening. **Denver, Co: American Water Work Association Research Foundation and American Water Work Association**.
- Ravazzini, A.M., Nieuwenhuijzen, A.F., and Graaf, J.H.M.J., (2005). Direct ultrafiltration of municipal wastewater: comparison between filtration of raw sewage and primary clarifier effluent. **Desalination**. 178: 51-62.
- Reddiroot'r, (2016). Problems and Solutions for Hard Water Buildup. Retrieved from <http://www.reddiplumbingwichita.com/blog/general/problems-and-solutions-for-hard-water-buildup>
- Rolence, C., Machunda, R.L., and Nja, K.N. (2016). Water hardness removal by coconut shell activated carbon. **International Journal of Science, Technology and Society**. 2(5): 97-102.
- Saeed, A.M., and Hamzah, M.J., (2013). New approach for removal of total hardness ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) from water using commercial polyacrylic acid hydrogel beads, study and application. **Int. Conf. Advanbiological and Biomedical**. 9(1): 1142-1156.
- Salahi, A., Mohammadi, T., Abbasi, M., and Rekabdar, F. (2010). Chemical Cleaning of Ultrafiltration Membrane after Treatment of Oily Wastewater. **Iranian Journal of Chemical Engineering**. 7: 17-28.
- Sancey, B., Charles, J., Trunfio, G., Badot, P.M., Jacquot, M., Hutinet, X., Gavaille, S., and Crini, M. Effect of additional sorption treatment by cross-linked starch of wastewater from a surface finishing plant. **Ind. Eng. Chem. Res**. 50: 1749-1756.
- Sandra, C. (2000). Cross-flow filtration of fruit juice. Working Report No. 13. Retrieved from: [www.mst.dk/udgiv/Publications/2000/0/87-7944-134-3/html/helepubl\\_eng.htm](http://www.mst.dk/udgiv/Publications/2000/0/87-7944-134-3/html/helepubl_eng.htm).

- Seo, S.J., Jeon, H., Lee, J.K., Kim, G.Y., Park, D., Nojima, H., Lee, J., and Moon, S.H., (2010) Investigation on removal of hardness ions by capacitive deionization (CDI) for water softening applications. **Water Research**. 44: 2267–2275.
- Sepehr, M. N., Zarrabi, M., Kazemian, H., Amrane, A., Yaghmaian, K., and Ghaffari, H.R. (2013). Removal of Hardness Agents, Calcium and Magnesium, by Natural and Alkaline Modified pumice Stones in Single and Binary Systems. **Applied Surface Science**. 274: 295-305.
- Septum, C., Rattanaphani, S., Bremner, J.B., and Rattanaphani, V. (2007). An adsorption study of Al(III) ions onto chitosan. **Journal of Hazardous Materials**. 148: 185-191.
- Shariful M.I., Sharif, S., Lee, J., Habiba, U., Ang, B.C., and Amalina, M.A. (2017). Adsorption of divalent heavy metal ion by mesoporous-high surface area chitosan/poly (ethylene oxide) nanofibrous membrane. *Carbohydrate Polymers*. 157: 57-64.
- Singh, N. and Cheryan, M. (1997). Fouling of a Ceramic Microfiltration Membrane by Corn Starch Hydrolysate. **Journal of Membrane Science**. 135: 195-202.
- Sitohy, M.Z., Labib, S.M., El-Saadany, S.S., and Ramadan, M.F. (2000). Optimizing the conditions for starch dry phosphorylation with sodium mono and dihydrogen orthophosphate under heat and vacuum. **Starch**. 52: 95–100.
- Sitohy, M.Z., and Ramadan, M.F. (2001) Degradability of different phosphorylated starches and thermoplastic films prepared from corn starch phosphomonoesters. **Starch/ Staerke**. 53(7): 317-322.
- Sotoa, D., Urdaneta, J., Pernía, K., and Leóna, O. (2014). Heavy metal ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$ ) adsorption in aqueous solutions by oxidized starches. **Polym. Adv. Technol**. 26: 147–152.
- Thomas, D.J., and Atwell, W.A. (1999). **Starches**. Minnesota : Egan Press. 91.
- Ujang, Z., and Anderson, G.K. (1996). Application of low-pressure reverse osmosis membrane for  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  removal from wastewater. **Water Science and Technology**. 34(9): 247-253.
- U. S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. (2002). U.S. Geological Survey.
- Wang, L., Wang, W., and Fukushi, K.I. (2008). Effects of operationals on ultrafiltration membrane fouling. **Desalination**. 229: 181-191.

- Wang, Y., Song, Y., Li, B., and Zhou, X. (2011) Chelating–Ultrafiltration Treatment of Some Heavy Metal Ions in Aqueous Solutions by Crosslinking Carboxymethyl Modified Cornstarch. **Water Air Soil Pollut.** 223: 679–686.
- Wenten, I.G. (1999). Teknologi Membran Industrial. **Penerbit Institut Teknologi Bandung.**
- Wijmans, J. G., Nakao, S., Van Den Berg, J. W. A., Troelstra, F. R., and Smolders, C. A. (1985). Hydrodynamic resistance of concentration polarization boundary layers in ultrafiltration. **Journal of Membrane Science.** 22: 117-135.
- Xia, S., Li, X., Zhang, Q., Xu, B., and Li, G. (2007). Ultrafiltration of surface water with coagulation pretreatment by streaming current control. **Desalination.** 204: 351-358.
- Xu, S.M., Zhang, S.F., Lu, R.W., Yang, J.Z., and Cui, C.X. (2002). Study on Adsorption Behavior Between Cr(VI) and Crosslinked Amphoteric Starch. **Journal of Applied Polymer Science.** 89: 263–267.
- Xu, S.M., Feng, S., Peng, G., Wang, J.D., and Yushan, A. (2005). Removal of Pb (II) by crosslinked amphoteric starch containing the carboxymethyl group. **Carbohydrate Polymers.** 60: 301–305.
- Yap, P. S., Ibrahim, S., and Ang, K. B. (2013). Treatment of rubber glove wastewater by ultrafiltration. **Malaysian Journal of Science.** 32(1): 61-65.
- Yu, W., and Graham, N.J.D. (2015). Performance of an integrated granular media – Ultrafiltration Membrane process for drinking water treatment. **Journal of Membrane Science.** 492: 164–172.
- Yun, C., (2012). The evaluation of two different PAC operations in combination with submerged ceramic MF membranes in surface water treatment. **Master Thesis. Tu Delft.**
- Zadghaffari, R., and Asr, S. S. (2013). Water softening using caustic soda: privileges and restrictions. **Polish journal of Chemical Technology.** 15(2): 116-121
- Zokaei, F., Kan=gnazchi, T., and Zare, A. (1999). Cell harvesting by microfiltration in deadend system. **Proc. Biochem.** 34: 803-810.



ตารางที่ ก.1 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันในการกำจัดความกระด้าง

ชนิดแป้งโมดิฟายด์	ความขุ่น (NTU)	TDS (mg/L)	COD (mg/L)	Total Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Removal Efficiency (%)	Absorption capacity (eq/g)
แป้งโซเดียม ออกเทนิล ซักซิเนต	0.21 ± 0.04	243.33±17.56	37.33±28.38	85.00 ± 8.66	18.27	1.90
แป้งอะซิทีเลท ออกซิไคซ์	0.51 ± 0.12	336.67±7.64	128.00±17.44	66.67 ± 2.89	35.58	3.73
แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์	0.29 ± 0.08	446.67±20.21	40.00±17.44	61.67 ± 7.64	40.38	4.23

ตารางที่ ก.2 คุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์ที่ พีเอช 5.5

contact time (min)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์					
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Absorption capacity (eq/g)	% Removal Efficiency
5	84.00 ± 0.00	0.20 ± 0.01	60.00 ± 2.00	865.33 ± 0.58	1.00	19.23
10	82.00 ± 0.00	0.22 ± 0.01	6.00 ± 0.00	880.33 ± 0.58	1.10	21.15
15	82.00 ± 0.00	0.16 ± 0.01	32.00 ± 0.00	877.33 ± 2.51	1.10	21.15
20	82.00 ± 2.00	0.12 ± 0.01	32.00 ± 2.00	878.33 ± 0.58	1.20	23.08
25	80.00 ± 0.00	0.13 ± 0.02	40.00 ± 2.00	875.00 ± 1.00	1.20	23.08
30	80.00 ± 0.00	0.12 ± 0.01	36.00 ± 0.00	855.00 ± 1.00	1.20	23.08
60	84.00 ± 0.00	0.29 ± 0.01	8.00 ± 0.00	787.33 ± 2.51	1.00	19.23
120	82.00 ± 2.00	0.42 ± 0.01	28.00 ± 2.00	753.33 ± 0.58	1.10	21.15
180	80.00 ± 0.00	0.25 ± 0.00	16.00 ± 2.00	785.33 ± 0.58	1.20	23.08
240	80.00 ± 0.00	0.59 ± 0.01	28.00 ± 2.00	763.33 ± 0.58	1.20	23.08
300	80.00 ± 0.00	0.60 ± 0.01	28.00 ± 2.00	748.33 ± 0.58	1.20	23.08

ตารางที่ ก.3 คุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้ง โมดิฟายด์ที่ พีเอชน้ำธรรมชาติ

contact time (min)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้ง โมดิฟายด์					
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Absorption capacity (eq/g)	% Removal Efficiency
5	86.00 ± 0.00	0.36 ± 0.00	36.00 ± 2.00	750.33 ± 0.58	0.90	17.31
10	86.00 ± 2.00	0.39 ± 0.02	36.00 ± 2.00	783.33 ± 0.58	0.90	17.31
15	84.00 ± 0.00	0.72 ± 0.01	44.00 ± 0.00	738.00 ± 1.00	1.00	19.23
20	86.00 ± 0.00	0.43 ± 0.01	32.00 ± 2.00	755.33 ± 0.58	0.90	17.31
25	86.00 ± 0.00	0.42 ± 0.01	44.00 ± 0.00	595.33 ± 0.58	0.90	17.31
30	84.00 ± 0.00	0.69 ± 0.01	40.00 ± 2.00	745.00 ± 0.00	1.00	19.23
60	84.00 ± 0.00	0.23 ± 0.01	36.00 ± 0.00	653.00 ± 2.00	1.00	19.23
120	80.00 ± 0.00	0.21 ± 0.02	28.00 ± 0.00	635.00 ± 0.00	1.20	23.08
180	76.00 ± 2.00	0.64 ± 0.01	36.00 ± 2.00	670.00 ± 0.00	1.40	26.92
240	76.00 ± 0.00	0.22 ± 0.01	40.00 ± 2.00	570.33 ± 0.58	1.40	26.92
300	74.00 ± 0.00	0.19 ± 0.01	44.00 ± 2.00	563.33 ± 0.58	1.50	28.85

ตารางที่ ก.4 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส 3-720 นาที ของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์

ระยะเวลา สัมผัส (นาที)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้ง โมดิฟายด์					
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Adsorption capacity (eq/g)	% Removal Efficiency
3	90.00 ± 0.00	1.96 ± 0.03	30.00 ± 2.00	400.00 ± 2.00	1.40	13.46
5	86.00 ± 0.00	0.26 ± 0.01	36.00 ± 2.00	305.33 ± 3.06	1.80	17.31
6	87.33 ± 1.15	1.67 ± 0.02	20.00 ± 2.00	362.00 ± 2.00	1.70	16.35
9	87.33 ± 1.15	1.15 ± 0.03	18.00 ± 0.00	353.00 ± 2.00	1.70	16.35
10	86.00 ± 0.00	0.36 ± 0.01	36.00 ± 4.00	483.00 ± 2.00	1.80	17.31
12	86.00 ± 0.00	2.12 ± 0.02	30.00 ± 4.00	447.00 ± 2.00	1.80	17.31
15	85.33 ± 1.15	1.86 ± 0.03	14.67 ± 3.05	243.33 ± 0.58	1.90	18.27
18	86.00 ± 0.00	2.14 ± 0.02	32.67 ± 3.05	370.33 ± 0.58	1.80	17.31
20	86.00 ± 0.00	0.33 ± 0.01	32.00 ± 0.00	555.33 ± 0.58	1.80	17.31
21	86.00 ± 0.00	1.57 ± 0.01	22.67 ± 3.05	337.00 ± 2.00	1.80	17.31
24	86.00 ± 0.00	1.77 ± 0.02	34.67 ± 3.05	307.00 ± 2.00	1.80	17.31
25	86.00 ± 0.00	0.39 ± 0.01	44.00 ± 2.00	495.00 ± 0.00	1.80	17.31
27	82.00 ± 0.00	2.18 ± 0.01	30.00 ± 2.00	450.00 ± 2.00	2.20	21.15

ตารางที่ ก.4 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส 3-720 นาที ของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ (ต่อ)

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์					
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Adsorption capacity (eq/g)	% Removal Efficiency
30	81.00 ± 0.00	2.43 ± 0.03	18.00 ± 0.00	282.00 ± 4.00	2.30	22.12
33	80.00 ± 0.00	1.75 ± 0.03	32.67 ± 3.05	297.00 ± 0.00	2.40	23.08
36	80.00 ± 0.00	2.46 ± 0.02	22.67 ± 3.05	342.00 ± 2.00	2.40	23.08
39	79.33 ± 1.15	2.61 ± 0.01	28.00 ± 2.00	295.00 ± 0.00	2.50	24.04
60	76.00 ± 0.00	1.21 ± 0.01	16.00 ± 2.00	583.00 ± 1.00	2.80	26.92
120	75.33 ± 1.15	2.34 ± 0.01	11.00 ± 2.30	513.00 ± 1.00	2.87	27.56
180	71.33 ± 1.15	1.89 ± 0.01	11.33 ± 2.30	566.33 ± 0.58	3.33	32.05
240	69.33 ± 1.15	1.91 ± 0.00	11.33 ± 2.30	373.33 ± 3.06	3.47	33.33
300	68.00 ± 0.00	1.77 ± 0.01	36.67 ± 3.05	390.00 ± 1.00	3.60	34.62
360	69.33 ± 1.15	1.09 ± 0.01	42.67 ± 3.05	458.00 ± 0.00	3.47	33.33
420	68.00 ± 0.00	0.97 ± 0.01	42.67 ± 3.05	397.33 ± 0.58	3.60	34.62
480	67.33 ± 1.15	1.07 ± 0.02	52.67 ± 3.05	428.33 ± 0.58	3.73	35.90
540	68.00 ± 0.00	1.12 ± 0.00	32.00 ± 2.00	430.33 ± 0.58	3.60	34.62
600	66.00 ± 0.00	1.39 ± 0.01	32.00 ± 2.00	443.33 ± 0.58	3.80	36.54
660	66.00 ± 0.00	1.15 ± 0.02	16.00 ± 2.00	402.00 ± 2.00	3.80	36.54
720	67.33 ± 1.15	0.97 ± 0.01	42.67 ± 3.05	472.00 ± 2.00	3.73	35.90

ตารางที่ ก.5 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส 3-720 นาที ของแป้งไม่ผ่านการตัดแปร

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิฟายด์					
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Adsorption capacity (eq/g)	% Removal Efficiency
3	104.00 ± 0.00	4.38 ± 0.01	44.00 ± 2.00	295.00 ± 2.00	0.00	0.00
5	104.00 ± 0.00	2.45 ± 0.01	36.00 ± 2.00	265.00 ± 1.00	0.00	0.00
6	104.00 ± 0.00	4.59 ± 0.03	40.00 ± 0.00	270.00 ± 1.00	0.00	0.00
9	103.33 ± 1.15	3.13 ± 0.03	44.00 ± 4.00	282.00 ± 1.00	0.10	0.96
10	103.33 ± 1.15	2.10 ± 0.00	40.00 ± 2.00	293.00 ± 2.00	0.10	0.96
12	103.33 ± 1.15	3.84 ± 0.01	36.00 ± 2.00	300.00 ± 2.00	0.10	0.96
15	103.33 ± 1.15	2.99 ± 0.00	40.00 ± 2.00	302.00 ± 2.00	0.10	0.96
18	103.33 ± 1.15	3.27 ± 0.00	40.00 ± 0.00	342.00 ± 1.00	0.10	0.96

ตารางที่ ก.5 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส 3-720 นาที ของแป้งไม่ผ่านการตัดแปร (ต่อ)

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิไฟด์					
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Adsorption capacity (eq/g)	% Removal Efficiency
20	103.33 ± 1.15	2.28 ± 0.03	40.00 ± 0.00	302.33 ± 3.06	0.10	0.96
21	103.33 ± 1.15	3.34 ± 0.00	32.00 ± 4.00	322.33 ± 0.58	0.10	0.96
24	102.00 ± 0.00	3.73 ± 0.03	20.00 ± 2.00	305.00 ± 2.00	0.20	1.92
25	103.33 ± 1.15	3.21 ± 0.00	36.00 ± 2.00	310.00 ± 2.00	0.10	0.96
27	103.33 ± 1.15	3.42 ± 0.03	26.67 ± 3.05	343.00 ± 4.00	0.10	0.96
30	103.33 ± 1.15	3.74 ± 0.02	48.00 ± 0.00	343.00 ± 0.00	0.10	0.96
33	103.33 ± 1.15	3.02 ± 0.01	36.67 ± 3.05	320.00 ± 1.00	0.10	0.96
36	103.33 ± 1.15	4.21 ± 0.01	40.00 ± 2.00	298.00 ± 1.00	0.10	0.96
39	103.33 ± 1.15	3.42 ± 0.03	42.67 ± 3.05	333.00 ± 0.00	0.10	0.96
60	101.33 ± 1.15	1.72 ± 0.00	64.00 ± 2.00	525.00 ± 0.00	0.30	2.88
120	101.33 ± 1.15	2.15 ± 0.00	48.00 ± 2.00	385.00 ± 1.00	0.30	2.88
180	101.33 ± 1.15	0.85 ± 0.01	32.00 ± 2.00	205.33 ± 0.58	0.30	2.88
240	101.33 ± 1.15	0.84 ± 0.02	48.00 ± 2.00	355.00 ± 2.00	0.30	2.88
300	101.33 ± 1.15	3.09 ± 0.01	32.00 ± 0.00	225.00 ± 2.00	0.30	2.88
360	101.33 ± 1.15	0.89 ± 0.00	48.00 ± 2.00	250.33 ± 0.58	0.30	2.88
420	101.33 ± 1.15	1.15 ± 0.01	48.00 ± 2.00	225.00 ± 0.00	0.30	2.88
480	101.33 ± 1.15	1.26 ± 0.01	32.00 ± 2.00	230.00 ± 0.00	0.30	2.88
540	101.33 ± 1.15	1.35 ± 0.01	32.00 ± 4.00	225.00 ± 2.00	0.30	2.88
600	101.33 ± 1.15	1.49 ± 0.00	32.00 ± 0.00	180.00 ± 2.00	0.30	2.88
660	101.33 ± 1.15	1.65 ± 0.01	32.00 ± 0.00	185.00 ± 2.00	0.30	2.88
720	97.33 ± 1.15	0.81 ± 0.00	32.00 ± 0.00	165.33 ± 0.58	0.70	6.73



ตารางที่ ก.6 ผลกระทบของปริมาณแบริ่งโมดิไฟด์ 1.0-5.0 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 5 นาที

ปริมาณแบริ่ง (กรัม)	คุณสมบัติน้ำหลังกำจัดด้วยแบริ่งโมดิไฟด์						
	pH	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความขุ่น (NTU)	COD (mg/L)	TDS (mg/L)	Absorption capacity (eq/g)	Removal efficient (%)
1.0	7.12 ± 0.02	85.33 ± 1.15	0.23 ± 0.00	44.00 ± 2.00	362.00 ± 2.00	1.90	18.27
1.5	7.03 ± 0.01	80.00 ± 0.00	0.16 ± 0.01	32.00 ± 2.00	420.33 ± 3.06	1.60	23.08
2.0	6.98 ± 0.01	76.00 ± 0.00	0.15 ± 0.00	56.00 ± 0.00	460.00 ± 1.00	1.40	26.92
2.5	6.92 ± 0.01	77.33 ± 1.15	0.14 ± 0.01	56.00 ± 2.00	555.33 ± 0.58	1.08	25.96
3.0	6.89 ± 0.00	74.00 ± 0.00	0.15 ± 0.02	52.00 ± 2.00	687.00 ± 1.00	1.00	28.85
3.5	6.86 ± 0.00	72.00 ± 0.00	0.18 ± 0.02	88.00 ± 0.00	810.00 ± 2.00	0.91	30.77
4.0	6.82 ± 0.00	72.00 ± 0.00	0.24 ± 0.02	72.00 ± 2.00	840.00 ± 0.00	0.80	30.77
4.5	6.80 ± 0.01	72.00 ± 0.00	0.45 ± 0.01	88.00 ± 0.00	1050.33 ± 0.58	0.71	30.77
5.0	6.69 ± 0.01	72.00 ± 0.00	0.43 ± 0.00	68.00 ± 0.00	1232.33 ± 3.06	0.64	30.77



ตารางที่ ก.7 คุณภาพน้ำหลังการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของปูนขาว-โซดาแอช ร่วมกับการใช้แป้งโมดิไฟด์ในการกำจัดความกระด้างในน้ำประปา

ความเข้มข้นสารเคมี		ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังตกตะกอน			ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยแป้งโมดิไฟด์								
Ca(OH) <sub>2</sub> (ppm)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ppm)	pH	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Removal Efficiency (%)	pH	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Total Alkalinity (mg/L)	Calcium ( mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Magnesium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ความ ขุ่น (NTU)	TDS (mg/L)	Absorption capacity (eq/g)	Removal Efficiency (%)
60	40	9.55	88.00	15.38	7.10	68.00	128.80	60.00	8.00	0.77	382.00	1.00	34.62
70	40	9.84	84.00	19.23	7.00	60.00	115.00	56.00	4.00	0.12	376.33	1.20	42.31
80	40	9.90	68.00	34.62	6.94	48.00	105.80	44.00	4.00	0.43	369.33	1.00	53.85
90	40	10.16	64.00	38.46	6.99	46.00	101.20	44.00	2.00	0.60	363.67	0.90	55.77
100	40	10.17	64.00	38.46	6.97	48.00	101.20	0.00	48.00	0.53	362.00	0.80	53.85
200	40	11.12	120.00	0.00	7.15	100.00	128.80	82.00	18.00	0.80	378.33	1.00	3.85

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.8 คุณภาพน้ำหลังการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของเบ็งโมดิฟายด์ ร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว-โซดาแอช

การศึกษา	ความเข้มข้นของเบ็ง (g/L)	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการกำจัดด้วยเบ็งโมดิฟายด์									
		Total Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Total Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	CH (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Non-CH (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Calcium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Magnesium (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	pH	ความขุ่น (NTU)	TDS (mg/L)	Absorption capacity (eq/g)
1	10	120.00	49.30	49.30	0	17.30	32.00	7.21	0.33	387.67	1.06
2	20	160.00	41.30	41.30	0	16.00	25.30	6.87	0.65	584.33	0.73
3	30	220.00	41.30	41.30	0	0.00	41.30	6.77	0.91	828.67	0.49
4	40	277.30	42.60	42.60	0	0.00	42.60	6.74	1.34	1,065.67	0.35
5	50	350.70	45.30	45.30	0	0.00	45.30	6.74	2.02	1,228.33	0.25





รูปที่ ข.1 ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน



รูปที่ ข.2 ถังเตรียมน้ำแข็งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์



## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Patcharin Racho and Kusuma Namseethan. (2016). Hardness Removal from Water by Modified Starch. 2016 5th International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2016). Tokyo.

*Materials Science Forum*  
ISSN: 1662-9752, Vol. 890, pp 159-162  
doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.890.159  
© 2017 Trans Tech Publications, Switzerland

Submitted: 2016-11-10  
Accepted: 2016-11-17  
Online: 2017-03-20

### Hardness Removal from Water by Modified Starch

Patcharin Racho<sup>1,a</sup> and Kusuma Namseethan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, <sup>2</sup>Master student, School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

<sup>a</sup>patcha@sut.ac.th (corresponding author)

**Keywords:** Hardness Removal, Modified Starch, Phosphate Monoester, Chemisorption

**Abstract:** This is a preliminary study for hardness removal via modified starch combined with an ultrafiltration process that provides on high effluence quality and low cost, footprint and environmental impact treatment. This studied on potential of chemisorption process using modified starch as absorbents for hardness removal. Four modified tapioca starches were selected for evaluation that includes of oxidize starch, di-starch phosphate, hydroxyphophyl starch and phosphate monoester as well as non-modified tapioca starch too. Phosphate monoester starch achieved the highest efficiency about 98.2% of hardness removal within the adsorption capacity about 18 mg-hardness removed/g-starch. The modified starch had capable to reduced total hardness from 350.5 mg/L as CaCO<sub>3</sub> to 6.3 mg/L as CaCO<sub>3</sub> from water. However, the modified starch is an organic matter its can be contaminates in water. Then, a coagulation-flocculation processes were applied for starch colloidal destabilization and flocs by aluminum chloride (PAC) and cationic polymer for starch separation. After that process, turbidity was less than 1 NTU in the effluents. However, the total dissolved solids were increased that may be cause of some starch was solutes. These should be having a future treatment for particulate removal and cutoff the soluble starch in water likes an ultrafiltration process.

#### Introduction

Calcium and magnesium salts are the most abundant species of water hardness, with a profile dependent on the geological characteristics of each region. Industries might have to spend money to soften their water as hard water can damage equipment by scaling such as piping, valves and pump. Also, the problem that can occur are mainly scaling which reduce efficiency on water heaters, boiler, cooling towers and many other processes. Lime soda and ion exchange are the presently processes used to remove total hardness from water. The lime soda process is now obsolete and high treatment footprint requirement. Moreover, the effluent of this process are contains about 30 mg/L as CaCO<sub>3</sub> of total hardness that caused by lime adjustment [1] that not sufficient quality for industries. Ion exchange is a popular method for hardness removal for industries because of low footprint and high effluence quality. Strongly acidic cation exchange resins used in the sodium form for remove water hardness. The softening units, when loaded with these cation, are then regenerated with sodium chloride that caused of very high salinity wastewater so water treatment must be treated further are wasteful costs and high salinity wastewater caused dissolve oxygen is lower impact on the aquatic systems. That must consider environmentally appropriate and cost effective brine concentrate management and disposal.

Tapioca starch is one of the most abundant polysaccharides found in nature and is widely utilized in various fields of Thailand's industry. Due to the complex structure of native starch it is insoluble in most organic solvents and needs modification prior utilization. Ionic liquids, modern green chemistry alternatives for common solvents were used as reaction media in starch modification. Several researches shown chemisorption processes are effectives for cationic removal with modified starch as an absorbent [2, 3, 4]. As low-cost and available mains industries of Thailand, modified tapioca starch-based products have been attractive as chelating agents for hardness removal from water. The influencing of starch types and mass were determined in this study. As well as the potential of starch separation from the water was evaluated too.

## Material and Methods

### Adsorbents

Four commercial modified starches were products of a factory in Nakhon Ratchasima, Thailand. That included of di-starch phosphate, oxidized starch, hydroxyphophyl starch and phosphate monoester starch. As well as, unmodified tapioca starch was evaluated, too.

### Groundwater sample

The groundwater was sampling from a campus of Suranaree University of Technology. The groundwater was sampled about 10 liters and kept at the room temperature during the period of experiments. The initial parameters were analyzed that including of pH, total hardness, turbidity, total dissolve solid (TDS) and chemical oxygen demand (COD) as shown in Table 1.

**Table 1** Ground water characteristics

Sample water	Total Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Turbidity (NTU)	TDS (mg/L)	COD (mg/L)
Groundwater	350.5	0.044	572	21.3

### Sorption experiments

Sorption studies were performed by batch technique at room temperature. A suitable cross linkage of modified starch was investigated by adding 1 g of starch in 100 ml of the groundwater and subjecting the mixtures to continuous shaking at 200 rpm and 24 hours of a contact time. Then, the suitable modified starch was selected for the optimum starch dosing study. That experiment was set up via varying the modified starch quantification with values of 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 and 10.0 g in 150 ml of the groundwater. Overall solutions were filtrated through 0.45 µm, Whatman. And, the concentration of total hardness, turbidity, total dissolves solid and COD in filtered water were evaluated.

### Coagulation and flocculation experiments

Jar test experiments were set-up for suspended and colloidal starches separation after the sorption processes. The coagulation operates about via rapid mixing 1 min (150 rpm). After that, a cationic polymer was added as a flocculants and slow mixing about 30 min (40 rpm) and 30 minutes of setting. Then, the supernatants were taken for chemical analyzed.

## Results and discussion

### Influencing of modified starch on hardness removal.

Overall results shown the phosphate monoester starch had the highest efficiency about 53.41% of hardness removal as details in Table 2. These had evident from several previous researches for metal removal via sorbed on modified starch. The Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> ions can be complexed reveals that its stability corresponds closely to the expectations based on the Ca(R-PO<sub>3</sub>) or Mg(R-PO<sub>3</sub>) as well as Pb<sup>2+</sup> ions in previous study [5]. However, the stability of metal on absorbent was depending on the basicity of the PO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Moreover, a phosphate monoester starch had higher efficiencies than the other modified starches. These can be explained by an absorption capacity and removal efficiency were depended on degree of substitution in functional group (DS), electronegativity and rate of the reaction that will be evaluated in future study.

**Table 2** Influencing of starch types

Types of starch 1.0 g/ Groundwater 100 ml	Efficiencies		Capacities	
	Average (%)	S.D.	Average (mg/L)	S.D.
None modified tapioca starch	1.74	3.96	0.61	0.40
Di-Starch Phosphate	10.50	6.03	3.68	0.60
Oxidize Starch	15.58	10.46	5.46	1.05
Hydroxypropyl Starch	9.13	2.26	3.20	0.23
Phosphate monoester Starch	53.41	13.93	18.72	1.39



#### *Influencing of starch concentration.*

As a phosphate monoester starch had the highest hardness removal efficiency that was selected for the sufficient dosing evaluation. Overall results showed that the hardness removal were increased when the starch mass increases. The highest efficiency was found about 98% of hardness removal at 10 g-starch dosing. This can be removed the total hardness from 350.5 mg /L as CaCO<sub>3</sub> to 6.3 mg/L as CaCO<sub>3</sub> in the effluents. This concentration was achieved supplies for the industry processes as soft water. However, COD and TDS in the effluents were increased. These may be cause by some starch can be solute in water.

**Table 3** Influencing of sorbent mass

Phosphate monoester (g)	Total Hardness		Turbidity (NTU)	TDS (mg/L)	COD (mg/L)
	Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Efficient (%)			
1.5	182.4	47.96	0.643	1,158	122.7
3.0	107.2	69.41	1.179	1,447	160.0
4.5	65.6	81.28	0.545	1,805	133.3
6.0	36.8	89.50	0.754	2,223	176.0
7.0	17.4	95.04	8.357	11,403	85.3
8.0	9.5	97.29	20.710	12,053	112.0
9.0	7.9	97.74	30.567	13,420	117.3
10.0	6.3	98.20	31.990	14,530	138.7

#### *Separation Techniques*

- Coagulation and flocculation processes.

Coagulation-flocculation is a conventional pre-treatment method used to separate the suspended and some dissolved compounds from water. Polyaluminum chloride (PAC) was a coagulant and cationic polymer (CP) as a flocculant. Overall results shown these were too effectiveness for turbidity removal that lower than 1 NTU as details in Table 3. Total hardness removal was increased when PAC or CP is increased. However, the hardness removal was lower than the previous study this caused of the less of adsorption contact time in this experiments. Two main the treatment problems were the increasing of COD and TDS concentration in the effluent. These may be caused of some starch can be solutes in water [6]. These should be having a future treatment for particulate removal and cutoff the soluble starch in water likes an ultrafiltration process.

**Table 4** Results of total hardness and turbidity from jar test method when adding PAC at 25°C

Conditions (mg/L)		Total hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		Turbidity (NTU)		COD (mg/L)		TDS (mg/L)	
PAC	CP	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.	Average	S.D.
0	0.5	177	2.36	0.567	0.02	146	0	2,618	28.96
10	0.5	112	2.36	0.097	0	122	8.96	2,468	6.24
20	0.5	65	4.08	0.087	0	119	7.76	2,510	10.80
30	0.5	62	2.36	0.270	0.04	122	8.96	2,558	27.18
40	0.5	53	6.24	0.197	0.02	128	0	2,567	12.47
50	0.5	40	4.08	0.060	0.01	73	14.70	2,437	22.48
0	0.1	222	2.36	0.077	0.01	91	0	2,670	32.66
0	0.2	208	2.36	0.227	0.02	97	8.49	2,572	22.48
0	0.3	83	3.12	0.213	0.02	97	8.49	2,573	15.46
0	0.4	50	8.16	0.167	0.01	97	8.49	2,573	12.47
0	0.5	63	3.12	0.353	0.01	103	8.49	2,627	20.55
0	1.0	75	4.08	0.417	0.01	97	8.49	2,638	8.50
Groundwater		332	0	0.620	0.01	9	0	702	8.50

- Potential of Modified Starch-Enhanced Ultrafiltration

In order to separate the heavy metal ions sorbed by modified starch or other sorption materials, an ultrafiltration (UF) technique can be used in several research. UF is a membrane filtration

technique where the low-pressure (<10 bar) separation process is based on size exclusion or particle capture. The pore size of ultrafiltration membranes is approximately between 2 and 100 nm that larger than the size of (hydrated) metal ions dissolved in water to be purified. Therefore, ultrafiltration membrane will reduce COD and TDS for system. In order to prevent the metal ions from passing through the membrane and to obtain high removal efficiency of metal ions polymer-enhanced ultrafiltration (PEUF) can be used. PEUF utilizes water-soluble polymers for the binding of metal ions from the water phase. The molecular weight of the formed complex is higher than the molecular weight cut-off of the membrane. In case of modified starch, it had molecule size in range of 5-30 micron. Therefore, the complex will be retained in the ultrafiltration cell. After the filtration process, the retentate can be treated in order to separate metal ions from the polymer and to reuse the polymeric agent. PEUF technique has several advantages including the high removal efficiency and binding selectivity of metal ions resulting in highly concentrated metal concentrates for reuse [7].

### Conclusion

A phosphate monoester starch was effective for hardness removal in water as lower than 10 mg/L as CaCO<sub>3</sub> in the effluents. Coagulation-flocculation processes were effective for starch colloidal destabilization and flocs as the turbidity was lower than 1 NTU. However, the modified starch is an organic matter its can be contaminates in water. The total dissolved solids and chemical oxygen demand were increased in the effluents that should be having a future treatment for particulate removal and cutoff the soluble starch in water likes an ultrafiltration process.

### Reference

- [1] Qasim S. R., Motley E. M., and Zhu G. *Water Works Engineering*. Chiang, Patel and Yerby, Inc., Dallas, Texas. (2000)
- [2] Sancey B., Trunfio G., Charles J., Minary J.F., and Gavaille S. Heavy metal removal from industrial effluents by sorption in cross-linked starch: Chemical study and impact on water toxicity. *Environmental Management*, **92**, p. 765-772, (2011)
- [3] Kim B. S., and Lim S. T. Removal of heavy metal ions from water by cross-linked carboxymethyl corn starch. *Carbohydrate Polymers*, **39** (3), p. 217-223, (1999)
- [4] Dong N. T., An N. T., Thien D. T., and Doung P. L. Adsorption of Hg(II) from aqueous solution using carboxymethyl glucomannan derivative. *Natural Polymer*, **50** (4), p. 515-520, (2012)
- [5] Da-Costa C. P., and Sigel H. Stabilities of complexes formed between lead(II) and simple phosphonate or phosphate monoester ligands including some pyrimidine-nucleoside 5'-monophosphates (CMP<sup>2-</sup>, UMP<sup>2-</sup>, dTMP<sup>2-</sup>). *Biological Inorganic Chemistry*, **4**, p. 508-514, (1999)
- [6] Irfan M., Butt T., Intiaz N., Abbas N., and Khan R. A., et al. The removal of COD TSS and colour of black liquor by coagulation-flocculation process at optimized pH settling and dosing rate. *Arabian Journal of Chemistry*. (2013)
- [7] Beak K., Yang J. S., and Yang, J. W. *Cationic Starch Enhanced Ultrafiltration for Nutrient Removal*. International Conference on Wastewater Treatment for Nutrient Removal and Reuse 2004. Asian Institute of Technology. Thailand. (2004)