การใช้ดินบำบัดและกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อควบคุมฟาวลิงของเมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

Land Treatment and Coagulation Process for Membrane Fouling Control in Palm Oil Mill Effluent Treatment

วันวิจิตร ทิมฐาน

Wanwijit Timthan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การใช้ดินบำบัดและกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อควบคุมฟาวลิงของเมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

Land Treatment and Coagulation Process for Membrane Fouling Control in Palm Oil Mill Effluent Treatment

วันวิจิตร ทิมฐาน
Wanwijit Timthan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University
2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้ดินบำบัดและกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อควบคุมฟาวลิงของเมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม
ผู้เขียน นางสาววันวิจิตร ทิมฐาน
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยศรี สุขสาโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุดมผล พืชน์ไพบูลย์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ ทองลิมป์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิต เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยศรี สุขสาโรจน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยศรี สุขสาโรจน์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....
(ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ .....
(วันวิจิตร ทิมฐาน)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....
(วันวิจิตร ทิมฐาน)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้ดินบำบัดและกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อควบคุมฟาวลิงของเมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม
ผู้เขียน นางสาววันวิจิตร ทิมฐาน
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบบ่อในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม จะมีค่าความเป็นด่าง ของแข็งแขวนลอย และซีโอดีสูง อีกทั้งมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์กลุ่มกรดฮิวมิกเป็นส่วนใหญ่ ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำทิ้ง (ค่าสี > 1,600 ADMI) จึงทำให้ไม่สามารถปล่อยทิ้งสู่สาธารณะได้ นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของสารอนินทรีย์ เช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม และซัลเฟอร์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าว โดยทำการศึกษาดังนี้ ส่วนที่ 1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ส่วนที่ 2. ควบคุมการอุดตันของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันในการกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากส่วนที่ 1 และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และสีได้ร้อยละ 90 และ 87.3 ตามลำดับ บำบัด UV_{254} ซีโอดี ทีโอซี และดีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 70 และน้ำที่ผ่านการบำบัดมีสีเหลืองอ่อน (ค่าสี = 209 ADMI) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินในคอลัมน์ ด้วยอัตราการเติมน้ำทิ้ง 3 cm/week พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 88.4 บำบัดซีโอดี และทีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 70 ส่วน UV_{254} สี และดีโอซีบำบัดได้เพียงร้อยละ 35 - 60 และน้ำที่ผ่านการบำบัดมีสีเหลืองเข้ม (ค่าสี = 709 ADMI) หลังจากนั้นจึงนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทั้งสองมากรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.45 μm จะสามารถควบคุมการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันที่นำไปสู่การเกิดฟาวลิงได้ดีกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง ส่งผลทำให้มีค่าฟลักซ์สูงขึ้น สามารถเดินระบบได้ระยะเวลานาน ดังนั้น ในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่มีลักษณะสมบัติดังกล่าวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงมีความเหมาะสมกว่าการบำบัดโดยดิน เนื่องจากสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย สารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีได้ดี แต่เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง จึงควรมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม รวมทั้งพิจารณาถึงการนำเมมเบรนมาใช้ร่วมด้วย เพื่อปรับปรุงคุณภาพหรือนำกลับมาใช้ใหม่

Thesis Title Land Treatment and Coagulation Process for Membrane Fouling Control in Palm Oil Mill Effluent Treatment
Author Miss Wanwijit Timthan
Major program Environmental Engineering
Academic Year 2015

ABSTRACT

The characteristic of palm oil mill effluent (POME) treatment by pond system has high alkalinity, suspended solids and chemical oxygen demand. There is contamination of high humic acid which caused brownish color (color > 1,600 ADMI). It can't be discharged to the public water resource. In addition, there are some inorganic matters such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, aluminum, silicon and sulfur. This research was aimed at the treat POME. These are the following steps of the study Part 1: optimization of POME treated by coagulation process. Part 2: control fouling microfiltration (MF) 0.45 µm to filter POME treated of the part 1 and land treatment. The results showed that the optimum conditions, POME treatment by coagulation. Using of polyaluminium chloride dose of 5 g/L control pH 6.5 is effective in the treatment of suspended solids and color was 90 % and 87.3%, respectively treated UV_{254}, COD, TOC and DOC more than 70% and the treated water is light yellow (color = 209 ADMI). In addition, POME treated by land treatment. It fill of POME rate of 3 cm/week to be effective in the treatment of suspended solids 88.4% for COD and TOC more than 70% UV_{254}, color and DOC was only 35 – 60% and the treated water is dark yellow (color = 709 ADMI). After that, when filtering POME treated both through MF can control concentration polarization that lead to the fouling has better filtering POME. The high flux, the system can have a longer term. Therefore, the coagulation is appropriate in the POME treatment. Due to can remove suspended solid, inorganic and organic matters which cause the color of water. But has the high cost, it should be developed to efficiently and at reasonable cost. Including considering the membrane combined process to improve the quality or reused.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี สุขสาโรจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชนิดา ชินผา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา การแก้ไขปัญหา และแนวทางการทำวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้การเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. – อุตสาหกรรม และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม แห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง สำหรับเงินอุดหนุนในการทำวิจัย และความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย น้ำทิ้ง และดินภายในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อใช้ทำการวิจัย

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณกรรณกร ผลโพธิ์ และ คุณเสาวภัคตร์ อ่อนน้อม ที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพิสิฐ ทิมฐาน และคุณแม่วชิรา ทิมฐาน อย่างสูงที่สนับสนุนทุนทรัพย์ ตลอดจนความห่วงใย ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจเสมอมา

ท้ายสุดขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดมา

วันวิจิตร ทิมฐาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญรูป	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 กรอบแนวคิด	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
2.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไปของปาล์มน้ำมัน	4
2.2 ปาล์มน้ำมันในประเทศไทย	4
2.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	5
2.4 ของเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	7
2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	9
2.6 กลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์	11
2.7 สารสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	17
2.8 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)	20
2.9 การบำบัดโดยดิน (Land treatment)	27
2.10 กระบวนการเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Synthetic membrane process)	39
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	49
3.1 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์	49
3.2 วิธีการวิจัย	50
3.3 วิธีการวิเคราะห์	58
บทที่ 4 ผลการวิจัย	62
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	62
4.2 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	69
4.3 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดิน	86
4.4 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการบำบัดโดยดิน ร่วมกับการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน	102

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	147
เอกสารอ้างอิง	150
ภาคผนวก ก มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง	164
ภาคผนวก ข การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน	166
ภาคผนวก ค การจำแนกดินในสวนปาล์ม	168
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์หาค่าฟลักซ์ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน	171
ประวัติผู้เขียน	175

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจากแหล่งต่างๆ 8
ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียรวมของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 8
ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบ่อ 9
ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยบ่อไร้อากาศและเติมอากาศ 10
ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยถังย่อยและบ่อ 10
ตารางที่ 2.6 ธาตุที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 13
ตารางที่ 2.7 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง 15
ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการโคแอกกูเลชัน 24
ตารางที่ 2.9 การจำแนกดินตามขนาดเม็ดดิน 28
ตารางที่ 2.10 การจำแนกประเภทดินโดยระบบ Unified 30
ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านดิน 35
ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในงานวิจัย 42
ตารางที่ 2.13 ประเภทของการอุดตัน 46
ตารางที่ 2.14 ข้อดีและข้อจำกัดของเมมเบรน 46
ตารางที่ 3.1 อัตราและความถี่การเติมน้ำในการบำบัดโดยดิน 54
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 64
ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน 80
ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในคอลัมน์ ในระยะเวลา 14 สัปดาห์ 95
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง กับค่าเฉลี่ยของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและบำบัดโดยดินในคอลัมน์ 103
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แร่ธาตุในเชิงคุณภาพบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาดและเมมเบรนไมโครฟลิเตรชันที่ผ่านการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 112
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งกับน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 113
ตารางที่ 4.7 ค่า Silt density index (SDI) ของน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยกลไกทางกายภาพเคมี 115
ตารางที่ 4.8 ค่าฟลักซ์และความต้านทานที่เกิดจากฟาวลิงของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 117
ตารางที่ 4.9 แร่ธาตุบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่กรองน้ำทิ้ง และน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน 126
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 127

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 128
ตารางที่ 4.12เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินอัตรา 3 cm/week และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินอัตรา 3 cm/week ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 135
ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ของการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน 138
ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน 140
ตารางที่ 4.15 ข้อดีและข้อจำกัดของการกระบวนการโคแอกกูเลชันและการบำบัดโดยดินในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ได้จากการทดลอง 143
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินร่วมกับ เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 145
ตารางที่ ก. 1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 164
ตารางที่ ข. 1 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้ม ควบคุมพีเอชในช่วง 5.5 – 6.5 166
ตารางที่ ข. 2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ควบคุมพีเอชในช่วง 6 - 7 166
ตารางที่ ข. 3 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L 167
ตารางที่ ข. 4 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L 167
ตารางที่ ค. 1 การจำแนกดินตามขนาดเม็ดดิน 168
ตารางที่ ค. 2 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 0 - 20 cm 168
ตารางที่ ค. 3 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 20 - 40 cm 168
ตารางที่ ค. 4 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 40 - 60 cm 168
ตารางที่ ค. 5 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 60 - 80 cm 169
ตารางที่ ค. 6 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 80 - 100 cm 169
ตารางที่ ค. 7 คุณสมบัติของดิน 169
ตารางที่ ค. 8 ธาตุอาหารในดิน 170
ตารางที่ ง. 1 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar 171
ตารางที่ ง. 2 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar 172

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ง. 3 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 µm ความดัน 1 bar 173
ตารางที่ ง. 4 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยดินอัตรา 3 cm/week ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 µm ความดัน 1 bar 174

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ผลผลิตน้ำมันปาล์มของโลก	5
รูปที่ 2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบเปียก	6
รูปที่ 2.3 การแสดงสีของกลุ่ม humic substance	12
รูปที่ 2.4 การจำแนกสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix	14
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของคลอโรฟิลล์	18
รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารฟลาโวนอยด์	19
รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของแทนนิน	20
รูปที่ 2.8 กระบวนการโคแอกกูเลชัน	21
รูปที่ 2.9 สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการวิจัย (a) สารส้ม (b) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	22
รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นของสารส้มและค่าพีเอชสำหรับการเกิดกลไกต่างๆในกระบวนการโคแอกกูเลชัน	23
รูปที่ 2.11 แผนภูมิสามเหลี่ยม (Triangular Soil Classification Chart)	29
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาระบรรทุกของน้ำ	32
รูปที่ 2.13 Slow – Rate Systems (a) hydraulic pathway (b) recovery pathways (c) subsurface pathway	33
รูปที่ 2.14 Rapid Infiltration Systems (a) hydraulic pathway (b) recovery pathway (c) natural drainage into surface waters	34
รูปที่ 2.15 Overland-Flow Systems	35
รูปที่ 2.16 หลักการของกระบวนการเยื่อแผ่น	39
รูปที่ 2.17 แบบจำลองการอุดตัน (a) CBM (b) IBM (c) SBM (d) CFM	41
รูปที่ 2.18 พื้นผิวและสูตรโครงสร้างของไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในงานวิจัย	42
รูปที่ 2.19 Concentration polarization (CP) และ cake layer	45
รูปที่ 2.20 รูปแบบการเกิดการอุดตัน (a) Pore Narrowing (b) Pore Plugging (c) Gel / Cake Formation	45
รูปที่ 3.1 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด (บ่อสุดท้าย) ที่ปล่อยรดสวนปาล์ม	50
รูปที่ 3.2 เครื่องจาร์เทสต์	52
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	52
รูปที่ 3.4 การเจาะเก็บดินแบบ disturbed sample	53
รูปที่ 3.5 คอลัมน์การบำบัดโดยดิน	54
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดิน	55
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ทดลองเมมเบรนแบบ dead – end	56
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรน	57

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 63
รูปที่ 4.2 ค่าสี (ADMI) ของการเจือจางน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 63
รูปที่ 4.3 การจำแนกน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM) 67
รูปที่ 4.4 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 67
รูปที่ 4.5 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการ โคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 5.5 – 6.5 71
รูปที่ 4.6 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 250 mg/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ 71
รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 6 - 7 72
รูปที่ 4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 400 mg/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ 72
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของสารส้มและค่าพีเอชสำหรับการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชัน 73
รูปที่ 4.10 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 5.5 – 6.5 75
รูปที่ 4.11 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ 75
รูปที่ 4.12 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 6 - 7 76
รูปที่ 4.13 ค่าของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ 76
รูปที่ 4.14 ผลของการเติมสารสร้างตะกอนในการทำลายเสถียรภาพและตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์ 77
รูปที่ 4.15 สีของ (a) น้ำทิ้ง (b) น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (c) น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม 79
รูปที่ 4.16 แผนภูมิเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน 81
รูปที่ 4.17 การจำแนกน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 โดยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM) 82
รูปที่ 4.18 การจำแนกน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/Lควบคุมพีเอช 6.5 โดยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM) 82

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ในน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน 83

รูปที่ 4.20 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 85

รูปที่ 4.21 แหล่งน้ำใกล้เคียงบริเวณสวนปาล์ม 87

รูปที่ 4.22 แผนภูมิสามเหลี่ยม (Triangular Soil Classification Chart) เทียบกับการจำแนกประเภทดินตามระบบ USCS 87

รูปที่ 4.23 ค่าเฉลี่ยการจำแนกดินในสวนปาล์มตามขนาดเม็ดดิน 88

รูปที่ 4.24 ตัวอย่างดินในสวนปาล์มที่ทำการเจาะเก็บที่ความลึกต่างๆดังนี้ (a) 0 - 20 cm (b) 20 – 40 cm (c) 40 – 60 cm (d) 60 – 80 cm (e) 80 – 100 cm 89

รูปที่ 4.25 ปริมาณน้ำไหลออกจากการบำบัดโดยดินในแต่ละสัปดาห์ 90

รูปที่ 4.26 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในแต่ละสัปดาห์ 92

รูปที่ 4.27 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในแต่ละสัปดาห์ 93

รูปที่ 4.28 สีของ (a) น้ำทิ้ง (b) น้ำกลั่นที่ผ่านดิน 1 cm/week (c) น้ำทิ้งที่ผ่านดิน 1 cm/week (d) น้ำกลั่นที่ผ่านดิน 3 cm/week (e) น้ำทิ้งที่ผ่านดิน 3 cm/week 97

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ในระยะเวลา 14 สัปดาห์ 97

รูปที่ 4.30 การจำแนกน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 1 และ 3 cm/week โดยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM) 98

รูปที่ 4.31 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ในน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน 99

รูปที่ 4.32 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 101

รูปที่ 4.33 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำกลั่นและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 101

รูปที่ 4.34 ค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ความดัน 1 bar กับเวลา 106

รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง(a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM ในการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดัน 1 bar 109

รูปที่ 4.36 ภาพถ่าย SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้ง (e) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (d) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้ง (f) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด 110

รูปที่ 4.37 องค์ประกอบของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ผลิตจาก PES 111

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.38 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านไมโครฟิลเตรชัน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 114
รูปที่ 4.39 ค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar กับเวลา 117
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง (a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM ในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar 121
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง (a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM ในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar 122
รูปที่ 4.42 ผล SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (e) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (d) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (f) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด 123
รูปที่ 4.43 ผล SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (e) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (d) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (f) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด 124
รูปที่ 4.44 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 130
รูปที่ 4.45 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรน ไมโครฟิลเตรชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 131
รูปที่ 4.46 ค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน อัตรา 3 cm/week ร่วมกับ เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar กับเวลา 133
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง(a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM ในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินด้วยอัตรา 3 cm/week ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar 136

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.48 ผล SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c, d, e, f) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน (h) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (g) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ บำบัดโดยดิน (i) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด 137

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบ่งเป็น 2 ประเภท คือการหีบแบบแห้ง และการหีบแบบเปียก โดยการหีบแบบแห้ง จะเป็นการหีบทั้งผล ไม่มีการแยกน้ำมันจากไฟเบอร์ในเมล็ด ทำให้ได้น้ำมันในปริมาณน้อย ส่วนการหีบแบบเปียก จะมีการใช้น้ำในการหีบเป็นจำนวนมาก และน้ำมันที่หีบได้จะมีปริมาณสูงกว่า ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้การหีบแบบเปียกในการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทั่วไปในกระบวนการสกัดจะมีการใช้น้ำประมาณ 5 – 7.5 ton สำหรับการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ 1 ton FFB ก่อให้เกิดเป็นน้ำเสียมากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำใช้ทั้งหมด (Ahmad *et al*., 2003) โดยจะมาจากแหล่งต่างๆ คือ การนึ่งปาล์ม การแยกน้ำและสลัดจ์จากน้ำมันปาล์ม การทำความสะอาดเครื่องมือ น้ำเสียจากการหล่อเย็น จึงมีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 0.56 m^3/ton FFB (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) ซึ่งในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่ มักใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ เช่น ระบบบ่อแบบไม่ใช้อากาศ และแบบใช้อากาศ ซึ่งเป็นระบบเปิด ใช้พื้นที่มากในการก่อสร้าง (Salihu and Alam, 2012) โดยพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังมีการปนเปื้อนของสีและสารอินทรีย์อยู่ เช่น แคโรทีน ลิกนิน แทนนิน โพลีฟีนอล และแอนโทไซยานิน เป็นต้น (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2542; Kongnoo *et al*., 2012) ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงงานส่วนใหญ่ ทำให้ไม่สามารถที่จะปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ เพราะสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจะไปขัดขวางการส่องผ่านของแสง ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสง ส่งผลให้เกิดการเน่าเสียบริเวณท้องน้ำ (Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010) อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจึงนิยมนำไปรดในสวนปาล์มหรือปล่อยให้ระเหยเองตามธรรมชาติ แต่ในช่วงฤดูฝนทางภาคใต้ของไทยมีปริมาณน้ำฝนมากและตกยาวนาน ทำให้น้ำบางส่วนไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมเนื่องจากรดสวนปาล์มไม่ทันหรือพื้นที่ไม่เพียงพอสำหรับชะลอน้ำ ทำให้จำเป็นต้องหาแนวทางบำบัดเพื่อให้สามารถทิ้งน้ำสู่แหล่งน้ำสาธารณะ และค่าต้องไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ โดยจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆที่บำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มพบว่ามีหลากหลายวิธี เช่น หัสลินดา บินมะแอ (2548) ใช้เชื้อราทนร้อนมาบำบัด ซึ่งสามารถลดค่าซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันในน้ำทิ้งได้ Ahmad *et al*. (2003) และ Ahmad *et al*. (2006) ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัด ทำให้สามารถลดค่าซีโอดี บีโอดี ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำ กลิ่น สี และโลหะต่างๆ โดยหลังจากนั้นได้กรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน และรีเวิร์สออสโมซิสจนสามารถนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ Wu *et al*. (2007) บำบัดโดยใช้การกรองโดยหินทราย และกระดาษกรอง ซึ่งสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และซีโอดีได้ โดยใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน Wah *et al*. (2002) ใช้กระบวนการกรองร่วมกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี และไนโตรเจนได้ดีกว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันหรือการหมุนเหวี่ยงร่วมกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน Sulaiman and Ling (2004) ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในการกรองพบว่ามีประสิทธิภาพบำบัดดี แต่ยังมีการ

หลงเหลือของสีในน้ำทิ้ง นอกจากงานวิจัยดังกล่าวยังมีอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง ได้ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อให้สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ แต่พบปัญหาเมมเบรนเกิดการอุดตันบ่อย ทำให้ต้องทำความสะอาด และเปลี่ยนเมมเบรน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง โดยปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ หากมีการบำบัดขั้นต้นที่มีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาข้างต้นเห็นได้ว่า สิ่งที่เป็นปัญหาหลักของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบบ่อในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม คือ สี ซึ่งเกิดจากกลุ่มสารอินทรีย์ที่กำจัดออกได้ยาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งเลือกใช้ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง มาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือ สารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีความสามารถในการบำบัดสี สารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย และอื่นๆได้ดี (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) และจากที่อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่มีการปล่อยน้ำทิ้งรดสวนปาล์มอยู่เดิม งานวิจัยจึงเลือกศึกษาการบำบัดโดยดินในคอลัมน์เป็นอีกวิธีหนึ่ง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกลไกทางกายภาพเคมี (กระบวนการโคแอกกูเลชัน) และกลไกทางกายภาพร่วมกับชีวภาพ (การบำบัดโดยดิน) แต่หากจะบำบัดน้ำทิ้งเพื่อให้สามารถปล่อยทิ้งสู่สาธารณะเพียงอย่างเดียว อาจจะไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยจะนำมากรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.45 μm ซึ่งนอกจากผลของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะสังเกตรูปแบบการอุดตันที่เกิดขึ้น และการควบคุมฟาวลิงอีกด้วย

1.2 **วัตถุประสงค์**

1.2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

1.2.2 ควบคุมการอุดตันของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการบำบัดโดยดิน

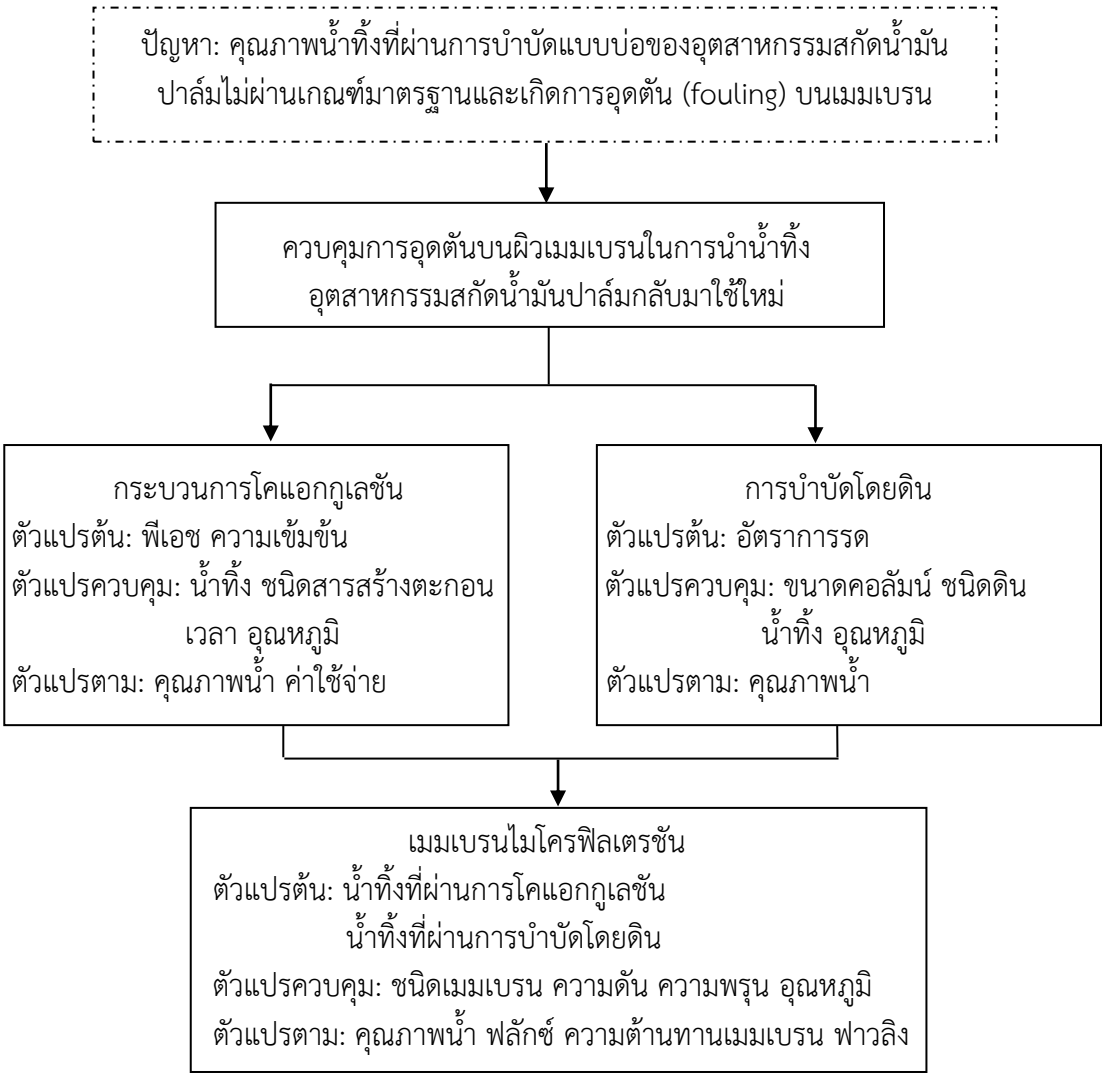
1.3 **ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1.3.1 เป็นการศึกษาเบื้องต้นสำหรับเป็นแนวทางที่จะพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีอยู่เดิม

1.3.2 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

1.3.3 สามารถเพิ่มมูลค่าของเสียประเภทสารอินทรีย์และธาตุอาหารจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้

1.4 **กรอบแนวคิด**



OUTPUT 1. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
2. การควบคุมการอุดตันของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

OUTCOME 1. ยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน
2. การนำน้ำทิ้งกลับไปใช้ใหม่
3. การนำสารอินทรีย์จากการบำบัดไปใช้ประโยชน์

IMPACT 1. อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่มีการใช้เมมเบรนอยู่เดิมสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อ
2. อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มอื่นๆสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้
3. สามารถลดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

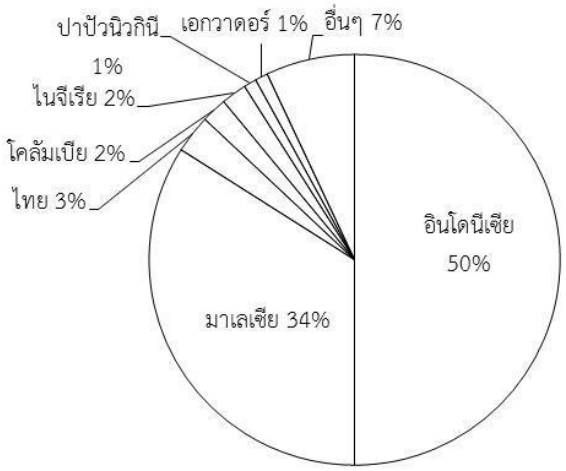
2.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไปของปาล์มน้ำมัน

ชื่อสามัญ	ปาล์มน้ำมัน (Oil palm)
ชื่อวิทยาศาสตร์	Elaeis guineensis Jacq
ถิ่นกำเนิด	ในแถบแอฟริกา และบริเวณเขตภูมิอากาศร้อนชื้น
แหล่งผลิตใหญ่ของโลก	มาเลเซีย อินโดนีเซีย พื้นที่ปลูกประมาณร้อยละ 80 ของโลก
แหล่งปลูกปัจจุบัน	มาเลเซีย อินโดนีเซีย ไนจีเรีย ไทย โคลัมเบีย อินเดีย และแหล่งปลูกใหม่ของประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น พม่า กัมพูชา (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2557)

2.2 ปาล์มน้ำมันในประเทศไทย

ประเทศไทยมีการผลิตปาล์มน้ำมันมากเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากอินโดนีเซีย และมาเลเซีย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยพบว่าพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง มีพื้นที่การปลูกทั้งหมดประมาณ 4.5 ล้านไร่ ผลิตผลปาล์มสด 11.33 ล้านตัน สกัดเป็นน้ำมันปาล์มดิบได้ 1.93 ล้านตัน มีมูลค่าทางเศรษฐกิจไม่ต่ำกว่า 64,000 ล้านบาท (หนังสือพิมพ์เดลินิวส์ หมวดเกษตร, 2556) โดยในช่วง พ.ศ. 2529 – 2553 ภาคใต้มีการผลิตปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เฉลี่ยประมาณร้อยละ 8.82 ต่อปี โดยมีการปลูกมากที่สุดในจังหวัดกระบี่ รองลงมาได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ชุมพร และนครศรีธรรมราช (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน), 2557) มีรายละเอียดดังนี้

- อำเภอเขาพนม อำเภออ่าวลึก อำเภอปลายพระยา และอำเภอคลองท่อม จังหวัดกระบี่ อำเภอพระแสง อำเภอท่าชนะ อำเภอพุนพิน อำเภอชัยบุรี และอำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- อำเภอท่าแซะ อำเภอปะทิว และอำเภอละแม จังหวัดชุมพร
- อำเภอสิเกา อำเภอวังวิเศษ อำเภอกันตัง และอำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง
- กิ่งอำเภอมะนัง อำเภอควนกาหลง และอำเภอควนโดน จังหวัดสตูล
- อำเภอคุระบุรี และอำเภอทับปุด จังหวัดพังงา
- อำเภอทุ่งใหญ่ อำเภอสิชล อำเภอชะอวด และอำเภอบางขัน จังหวัดนครศรีธรรมราช
- อำเภอกระบุรี อำเภอกะเปอร์ และอำเภอเมือง จังหวัดระนอง
- อำเภอบาเจาะ อำเภอเจาะไอร้อง อำเภอยี่งอ และอำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส
- อำเภอสะเดา อำเภอเทพา และอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา
- อำเภอป่าบอน และอำเภอตะโหมด จังหวัดพัทลุง (สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5 จังหวัดสงขลา, 2554)



รูปที่ 2.1 ผลผลิตน้ำมันปาล์มของโลก
ที่มา : ดัดแปลงจาก Bob Norman and Simon Chrismas (2015)

2.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการสกัดแบบแห้งและกระบวนการสกัดแบบเปียก แบบแห้งจะเป็นการหีบทั้งผลปาล์ม จะได้น้ำมันปริมาณน้อย ส่วนแบบเปียก จะสกัดจากทะลายปาล์มสด กะลา ใยปาล์ม และทะลายเปล่า รวมทั้งต้องใช้น้ำในกระบวนการสกัด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ โดยมีขั้นตอนในการสกัดดังนี้

2.3.1 การนึ่งทะลายปาล์มด้วยไอน้ำ (sterilization)

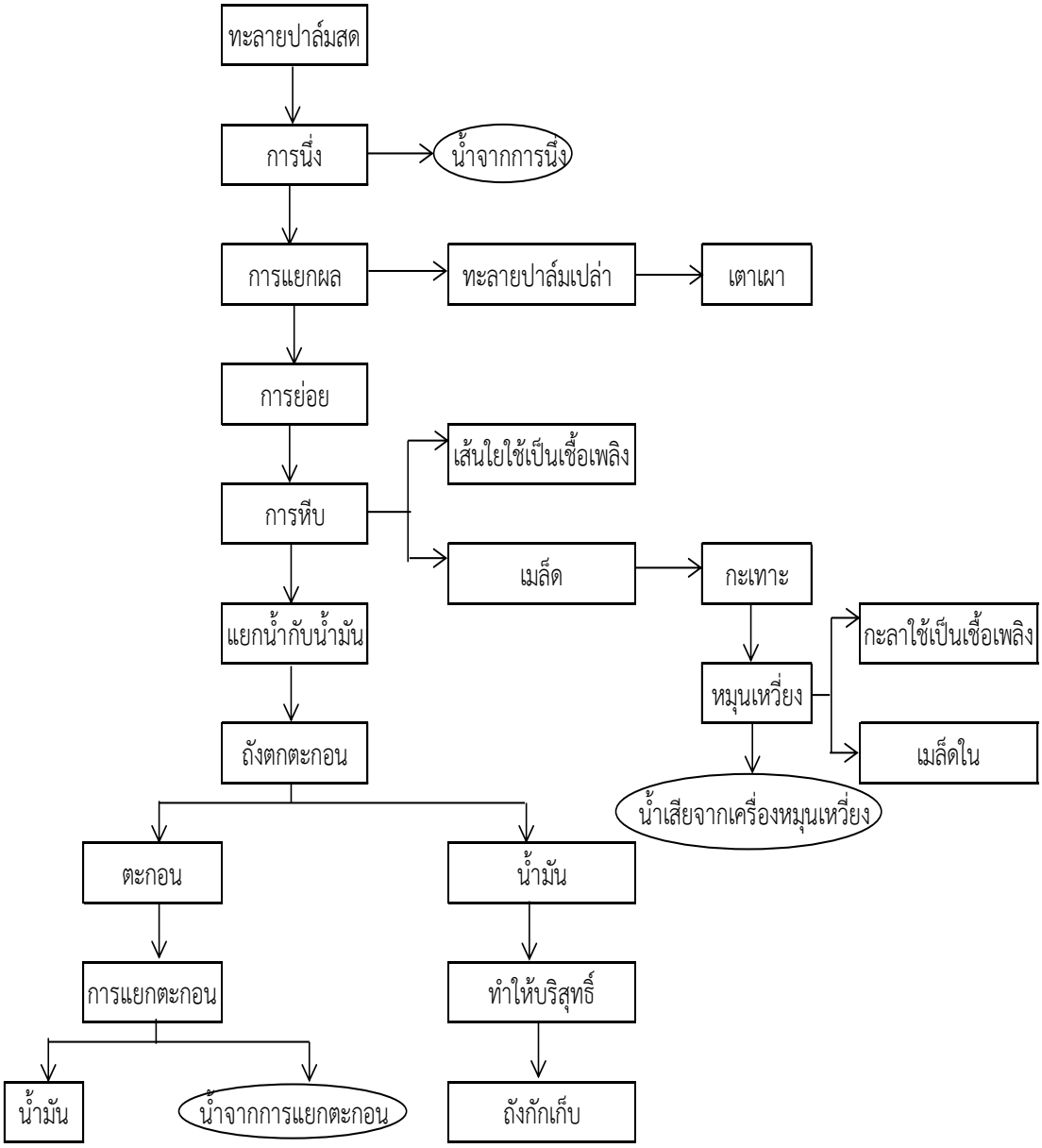
เป็นขั้นตอนแรกของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยจะนำทะลายปาล์มเข้าสู่หม้อนึ่ง ใช้ไอน้ำอบที่อุณหภูมิประมาณ 140 $^{\circ}$C เป็นเวลา 75 - 90 min ภายใต้ความดัน 3x10^{5} Pa ขั้นตอนการนึ่งทะลายปาล์มนี้จะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซีส ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มสามารถหลุดจากขั้วผลได้ง่าย ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดน้ำเสียจากน้ำที่ใช้ในการนึ่งประมาณ 0.9 ton/ton CPO

2.3.2 การแยกผล การย่อย และการหีบ (stripping, digestion and pressing)

เป็นการส่งทะลายปาล์มเข้าเครื่องแยกผลปาล์ม เพื่อให้ผลปาล์มหลุดออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป เพื่อใช้เป็นวัสดุคลุมดินหรือเป็นเชื้อเพลิง จากนั้นจะนำผลปาล์มไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด นำไปนึ่งที่อุณหภูมิ 80 – 90 $^{\circ}$C นาน 20 - 30 min จากนั้นผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมันปาล์มร้อยละ 35 - 45 น้ำร้อยละ 45 – 55 และพวกไฟเบอร์

2.3.3 การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (clarification)

นำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัด ส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก จากนั้นนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดน้ำมันอีกครั้ง ซึ่งตะกอนที่ตกจมอยู่ด้านล่างจะเกิดประมาณ 1.5 ton/ton CPO (Rupani *et al*., 2010; Wu *et al*., 2010)



รูปที่ 2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบเปียก
ที่มา : ดัดแปลงจาก Wu *et al*. (2010)

2.4 ของเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

2.4.1 ของเสียในรูปของแข็ง

เช่น เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า เป็นต้น ซึ่งของเสียเหล่านี้ถูกนำมาบดเป็นวัสดุคลุมดิน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในส่วนของหม้อนึ่งไอน้ำของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งจะก่อให้เกิดของเสียที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เช่น ทาร์และเขม่า มีขนาด 20 – 100 μm ฝุ่น 3,000 – 4,000 mg/nm รวมทั้งพวกเถ้าอีกเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดอย่างถูกวิธีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ (Igwe and Onyegbado, 2007)

2.4.2 ของเสียในรูปของเหลว (น้ำเสีย)

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบเปียกมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมาก ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจึงมีปริมาณมากเช่นกัน ประมาณ 0.56 m^3/ton FFB (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) โดยขั้นตอนสำคัญที่ทำให้เกิดน้ำเสีย คือ กระบวนการนึ่งและกระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมีอุณหภูมิสูง ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4 – 5 น้ำเสียมีสีน้ำตาลดำเข้ม ประกอบด้วยของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ในปริมาณสูง จึงมีความจำเป็นต้องบำบัดให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดก่อนจะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าเกินมาตรฐาน (ประยูร ฟองสถิต และจุฑามาศ บุญมา, 2554) อีกทั้งน้ำเสียมีสีน้ำตาลดำเข้ม หากปล่อยทิ้งสู่สาธารณะจะทำให้แสงอาทิตย์ไม่สามารถส่องลงสู่ใต้ผิวน้ำได้ ส่งผลกระทบต่อพืชน้ำและสิ่งมีชีวิตใต้แหล่งน้ำ (Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010) โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจะมาจากแหล่งต่างๆ และมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแหล่งที่ทำให้เกิดน้ำเสียแหล่งใหญ่ๆ คือ

1) น้ำเสียจากการนึ่งปาล์ม น้ำส่วนนี้แม้จะมีน้ำมันอยู่แต่มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอีมันชัน โดยทั่วไปการนึ่งทะลายปาล์ม 25 ton จะมีน้ำเสียจากการนึ่งปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 2 - 3 m^3
2) น้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน (เกิดมากที่สุด) กรณีที่ใช้ดีแคนเตอร์ (Decanter) ในการแยกน้ำเสียและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.35 m^3/ton FFB และกรณีที่ใช้ซีพาเรเตอร์ (Separator) จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกประมาณ 0.65 m^3/ton FFB
3) น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เช่น เครื่องแยก กรวดทราย เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ เครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง
4) น้ำเสียจากการหล่อเย็น หม้อกำเนิดไอน้ำ และเครื่องระเหย เป็นน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมาก และสะอาดอยู่ ส่วนใหญ่มีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่
5) น้ำสลัดจ์จากเครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge) เกิดขึ้นประมาณ 0.03 - 0.15 m^3/ton FFB (ธนกฤต พรหมทอง, 2552)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจากแหล่งต่างๆ

ลักษณะสมบัติ	น้ำเสียจากการนึ่ง	น้ำเสียจากการแยกน้ำมัน	น้ำเสียจากเครื่องหมุนเหวี่ยง
พีเอช (pH)	5.0	4.5	-
บีโอดี (Biochemical oxygen demand 3 day), mg/L	23,000	29,000	5,000
ซีโอดี (Chemical oxygen demand), mg/L	47,000	64,000	15,000
น้ำมันและไขมัน (Oil and Grease), mg/L	4,000	7,000	300
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids), mg/L	5,000	23,000	7,000
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solid), mg/L	34,000	22,000	100
แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen), mg/L	20	40	-
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen), mg/L	600	1,200	100

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rupani *et al*. (2010); Wu *et al*. (2010)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียรวมของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

ลักษณะสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิ (Temperature), °C	80 – 90 [b]
พีเอช (pH)	4.7 [b]
สี (Color)	151 [a]
กลิ่น (Odor) , Threshold odor number	300 [a]
น้ำมันและไขมัน (Oil and grease), mg/L	4,000 [b]
ความขุ่น (Turbidity), NTU	11,000 [a]
บีโอดี (Biochemical oxygen demand 3 day), mg/L	25,000 [b]
ซีโอดี (Chemical oxygen demand), mg/L	50,000 [b]
ของแข็งทั้งหมด (Total solids), mg/L	40,500 [b]
ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids), mg/L	18,000 [b]
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solid), mg/L	20,500 [a]
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile solids), mg/L	34,000 [b]
แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen), mg/L	35 [b]
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen), mg/L	750 [b]
ค่าความเป็นด่างทั้งหมด (Total alkalinity), mg/L	523 [c]

ที่มา : ดัดแปลงจาก [a]Ahmad *et al*. (2006); [b]Rupani *et al*. (2010); [c]Yejian *et al*., (2008)

2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

เนื่องจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากต่อวัน และมีลักษณะสมบัติ คือ กลิ่นไม่พึงประสงค์ อุณหภูมิสูง พีเอชต่ำ ปริมาณของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์สูง ซึ่งเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น โดยอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมากกว่าร้อยละ 85 มักใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อ เนื่องจากมีข้อดีคือเป็นระบบที่มีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่ในการก่อสร้าง และใช้ระยะเวลานานในการบำบัด (Rupani *et al*., 2010; Salihu and Alam, 2012) ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้เป็นระบบบ่อแบบต่อเนื่อง คือประกอบด้วยบ่อไร้อากาศ และเติมอากาศหลายบ่อ เช่น

1) ถังย่อยและบ่อแฟคคัลเททีฟ (Tank digestion and facultative ponds)

เป็นระบบบำบัดที่น้ำเสียจะผ่านกระบวนการกำจัดน้ำมันก่อน ซึ่งระบบนี้จะใช้เวลาเก็บกักประมาณ 20 day โดยจะมีการกวนผสม ซึ่งจะเกิดแก๊สมีเทน (CH_4) ออกสู่บรรยากาศ และน้ำที่ออกจากระบบนี้ควรจะมีบ่อรองรับก่อนจะปล่อยทิ้ง

2) ถังย่อยและกลไกการเติมอากาศ (Tank digestion and mechanical aeration)

ระบบนี้ประกอบด้วยบ่อลดอุณหภูมิและปรับกรด ถังย่อยแบบไร้อากาศ และบ่อเติมอากาศ โดยน้ำเสียจะเข้าบ่อลดอุณหภูมิและปรับกรดประมาณ 1 – 2 day ก่อนจะมาผสมกันในบ่อย่อยไร้อากาศ ใช้เวลาเก็บกักประมาณ 20 day จึงจะปล่อยลงบ่อเติมอากาศอีก 20 day แล้วจึงปล่อยทิ้ง

3) บ่อไร้อากาศและบ่อแฟคคัลเททีฟ (Anaerobic and facultative pond)

เป็นระบบที่ต้องประกอบกันหลายๆบ่อ โดยน้ำเสียที่กำจัดไขมันแล้วจะเข้าบ่อปรับกรดประมาณ 2 – 3 day ก่อนเข้าบ่อไร้อากาศซึ่งมีความลึกประมาณ 5 – 7 m เวลาเก็บกัก 30 – 80 day และบ่อแฟคคัลเททีฟที่มีความลึกประมาณ 1 – 1.5 m ก่อนจะปล่อยทิ้ง (Igwe and Onyegbado, 2007; Wong, 1980)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบ่อ

ลักษณะสมบัติ	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยบ่อผึ่ง	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดย Covered lagoon และบ่อผึ่ง	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดย Covered lagoon บ่อเติมอากาศ และบ่อผึ่ง
พีเอช	7.8	8.2	9.0
ซีโอดี (COD), mg/L	1,332	1,110	222
บีโอดี (BOD), mg/L	146	72	60
ของแข็งทั้งหมด (TS), mg/L	4,134	3,885	2,533
ของแข็งแขวนลอย (SS), mg/L	435	253	22
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP), mg/L	28	154	79
แอมโมเนียไนโตรเจน , mg/L	195	90	2

ที่มา: โรสนา กาซอ และคณะ (2555)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยบ่อไร้อากาศและเติมอากาศ

ลักษณะสมบัติ	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด	
	ค่าเฉลี่ย	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ซีโอดี (Chemical oxygen demand), mg/L	1,025	98.77
ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids), mg/L	150	93.94
ความขุ่น (Turbidity), NTU	350	79.71
สี (Color), Pt-Co	2,825	65.34
แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen), mg/L	5.25	97.98

ที่มา : Salaiman and Ling (2004)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยถังย่อยและบ่อ

ลักษณะสมบัติ	น้ำเสียที่บำบัดโดยถังย่อยและบ่อเติมอากาศ		น้ำเสียที่บำบัดโดยถังย่อยแบบกวนผสมและบ่อ	
	ค่าเฉลี่ย	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
พีเอช (pH)	8.1	-	7.3	-
บีโอดี (Biochemical oxygen demand 3 day), mg/L	120	99.6	610	97.8
ซีโอดี (Chemical oxygen demand), mg/L	1,460	98.1	4,820	93.0
ของแข็งทั้งหมด (Total solids), mg/L	6,720	88.2	10,360	80.0
ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids), mg/L	1,060	95.2	4,680	76.1
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile solids), mg/L	2,160	95.0	5,000	88.5
น้ำมันและไขมัน (Oil and grease), mg/L	30	99.7	130	98.5
แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen), mg/L	3	94.0	180	35.0
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen), mg/L	100	90.3	520	38.8

ที่มา : ดัดแปลงจาก Egbu (2000)

จากตารางที่ 2.3 - ตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยระบบบำบัดแบบบ่อ ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดยังไม่เหมาะที่จะปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ เนื่องจากมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังแสดงไว้ในตารางที่ ก. 1 จึงมีการศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีอื่นๆ ดังนี้

1) การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) เช่น การดักด้วยตะแกรง การตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง
2) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) เช่น การบำบัดแบบเติมอากาศ และไม่ใช้อากาศ
3) การบำบัดทางกายภาพเคมี (Physicochemical treatment) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดตะกอนหรืออนุภาคในน้ำ ซึ่งอาจประยุกต์ใช้เพื่อนำกลับมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินหรืออาหารสัตว์ เช่น การตกตะกอนและการหมุนเหวี่ยง (Sedimentation and centrifugation) สามารถแยกน้ำมัน น้ำ และตะกอนออกจากกันได้ ขึ้นอยู่กับแรงหมุนเหวี่ยงที่ใช้ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นกระบวนการเติมสารสร้างตะกอนลงไปในน้ำเสียเพื่อไปทำลายเสถียรภาพอนุภาคในน้ำ จนเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนตกลงสู่ด้านล่าง โดยสารสร้างตะกอนที่ใช้มีทั้งพวกสารเคมี สารสร้างตะกอนที่ได้จากธรรมชาติ นอกจากการใช้สารสร้างตะกอนยังมีการใช้ประจุไฟฟ้า ที่เรียกว่า electrocoagulation อีกด้วย การดูดซับ (Adsorption) สามารถใช้กำจัดน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้ โดยอาจใช้เป็นไคโตซาน แอคติเวสเต็จคาร์บอน
4) เมมเบรน ยังไม่มีการใช้ในระดับอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมากนัก เนื่องจากน้ำเสียมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดฟาวลิงและลดประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดขั้นต้นก่อน เช่น การกรอง การโคแอกกูเลชัน (Wu *et al*., 2010)

2.6 กลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

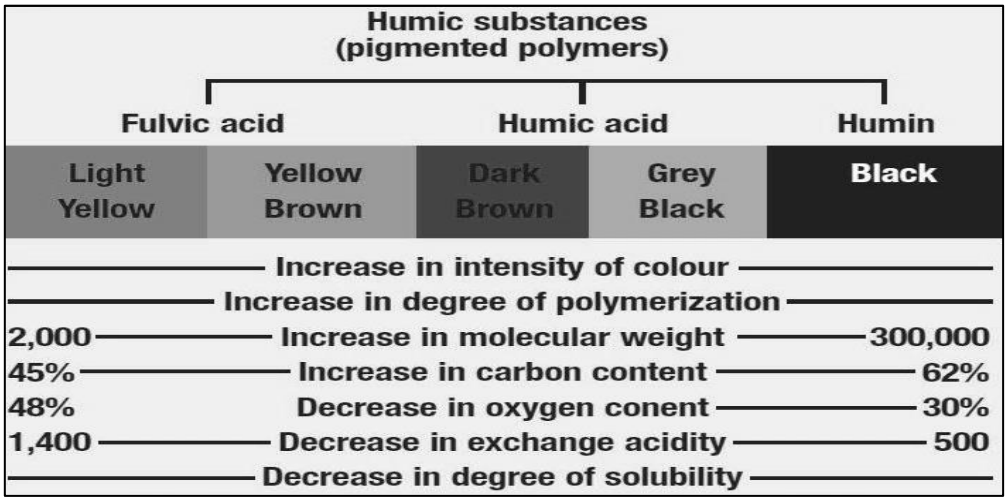
ในทางสิ่งแวดล้อมจะสนใจสารอินทรีย์ที่พบในธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า Natural Organic Matter (NOM) หมายถึง สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วม เช่น ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen, H) ออกซิเจน (Oxygen, O) ไนโตรเจน (Nitrogen, N) ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) ซัลเฟอร์ (Sulfur, S) และคอรีน (Chlorine, Cl) เป็นต้น ดังนั้นสารอินทรีย์ทุกชนิดจะต้องมีธาตุคาร์บอนอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นสารฮิวมิก (Humic) และสารที่ไม่ใช่ฮิวมิก (Non - humic) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1) สารฮิวมิก จะมีลักษณะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) คือมีสมบัติไม่ละลายในน้ำ ประกอบด้วยกลุ่มฮิวมิน (Humin) คือสารฮิวมิกที่ไม่ละลายน้ำ กรดฮิวมิก (humic acid) เป็นสารฮิวมิกที่จะไม่ละลายน้ำที่พีเอชน้อยกว่า 2 และฟุลวิก (fulvic) เป็นสารฮิวมิกที่ละลายน้ำได้ทุกพีเอช

2) สารที่ไม่ใช่ฮิวมิก จะมีลักษณะชอบน้ำ (Hydrophilic) คือมีสมบัติละลายในน้ำ ประกอบด้วยสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน

และนอกจากนี้สารอินทรีย์ธรรมชาติยังสามารถแบ่งตามขนาดของอนุภาคได้อีก โดยใช้การกรองผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนต่างๆ จะแบ่งสารอินทรีย์ได้ออกเป็น 3 ประเภท คือสารอินทรีย์ละลายน้ำ Dissolved Organic Matter (DOM) มีขนาดน้อยกว่า 0.22 μm สารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำ Particulate Organic Matter (POM) มีขนาดมากกว่า 1.0 μm และสารอินทรีย์ประเภทคอลลอยด์ Colloidal Organic Matter (COM) มีขนาดระหว่าง 0.22 - 1.0 μm (Owen *et al*., 1993) โดยทั่วไปพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ได้แก่ ทีโอซี (Total organic carbon) ดีโอซี (Dissolved organic carbon) สี (Color) UV absorbance at wavelength 254 nm (UV_{254}) และ Specific ultraviolet absorption (SUVA) ซึ่งจากลักษณะสมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เห็นได้ว่ามีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดีสูง น้ำเสียมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ (Ahmad *et al*., 2006) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และเมื่อผ่านการบำบัดแบบบ่อสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ลงได้ แต่จะยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 - ตารางที่ 2.5 และน้ำทิ้งยังคงมีสีน้ำตาล เนื่องจากสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ส่วนสารอนินทรีย์ (Inorganic) คือ สารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ โดยสารอนินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ จำนวนมาก เช่น ซัลเฟอร์ (Sulfur) ออกซิเจน (Oxygen) คลอรีน (Chlorine) โซเดียม (Sodium) แมกนีเซียม (Magnesium) และ อะลูมิเนียม (Aluminium) เป็นต้น โดยสารประกอบอนินทรีย์มักไม่มีพันธะเชื่อมระหว่างอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน ถึงแม้สารประกอบอนินทรีย์จะมีอยู่มากมายแต่เทียบไม่ได้กับจำนวนของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในโลก สารประกอบคาร์บอนเกือบทั้งหมดถูกจัดให้เป็นสารประกอบอินทรีย์แต่ก็มีบางตัว ถูกกำหนดชัดเจนว่าเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่นคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) และคาร์บอเนต (carbonate) (อนุสิษฐ์ เกื้อกูล, 2012) โดยในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจะพบสารอนินทรีย์ได้เช่นกัน (Yejian *et al*., 2008) ดังแสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.3 การแสดงสีของกลุ่ม humic substance

ที่มา: Stevenson, 1982

ตารางที่ 2.6 ธาตุที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

ธาตุ	ค่าเฉลี่ย
อะลูมิเนียม (Aluminum), mg/L	6.299
แบเรียม (Barium), mg/L	0.480
แคลเซียม (Calcium), mg/L	607.3
คอปเปอร์ (Cupper), mg/L	5.08
เหล็ก (Iron), mg/L	61.17
โพแทสเซียม (Potassium), mg/L	5,533
แมกนีเซียม (Magnesium), mg/L	1,065
แมงกานีส (Manganese), mg/L	8.572
โซเดียม (Sodium), mg/L	87.92
ฟอสฟอรัส (Phosphorus), mg/L	277.7
กำมะถัน (Sulfur), mg/L	400
ซิลิกอน (Silicon), mg/L	99.67
ดีบุก (Tin), mg/L	3.669
สตรอนเซียม (Strontium), mg/L	5.263
สังกะสี (Zinc), mg/L	6.83

ที่มา : ดัดแปลงจาก Yejian *et al*. (2008)

2.6.1 Specific ultraviolet absorbance (SUVA)

SUVA เป็นดัชนีชี้วัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในเชิงคุณภาพ โดยคำนวณจากค่า UV_{254} (cm^{-1}) หารด้วยค่า DOC (mg/L) ดังสมการ

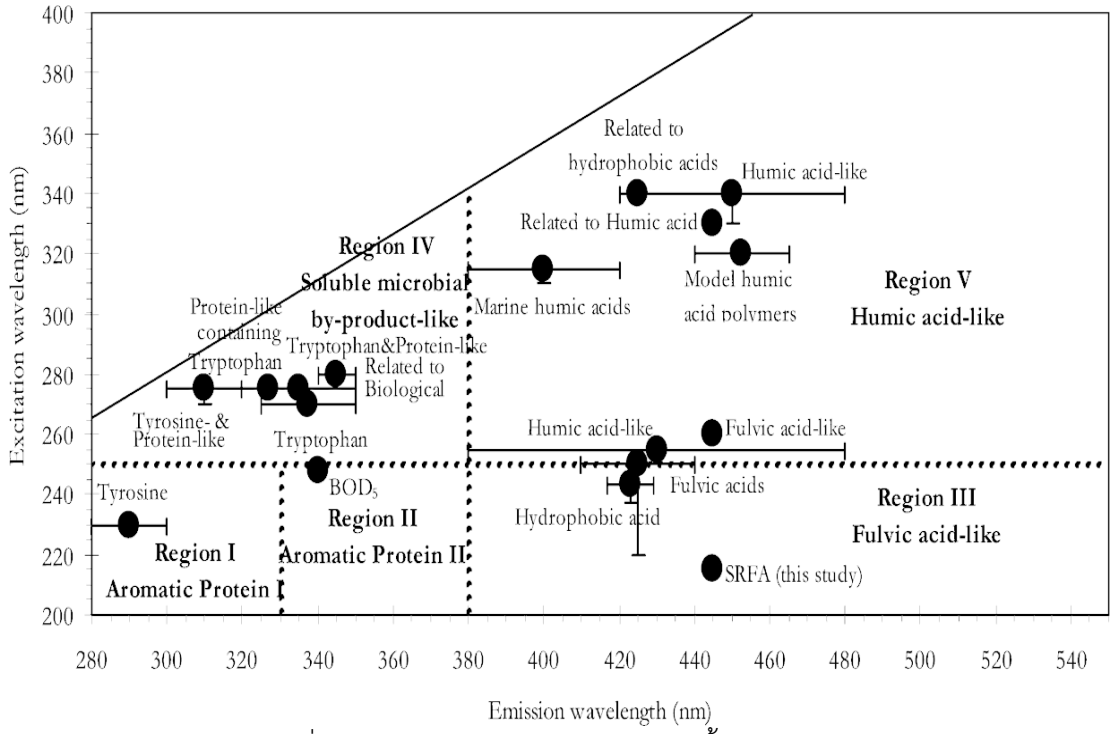
$$SUVA = \frac{UV_{254}\left(cm^{-1}\right) \times 100}{DOC\ \left(\frac{mg}{L}\right)}$$

- SUVA มีค่ามากกว่า 4 L/mg-m ประกอบด้วยสารกลุ่มฮิวมิกในน้ำเป็นส่วนใหญ่ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) สูง และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- SUVA มีค่าอยู่ในช่วง 2 - 4 L/mg-m ประกอบด้วยสารกลุ่มฮิวมิกในน้ำและสารอินทรีย์ธรรมชาติอื่นๆ มีทั้งสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และชอบน้ำ (hydrophilic) ปะปนกันอยู่ รวมทั้งมีน้ำหนักโมเลกุลหลากหลาย
- SUVA มีค่าน้อยกว่า 2 L/mg-m ประกอบด้วยสารกลุ่มไม่ใช่ฮิวมิก (non humic) เป็นส่วนใหญ่ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ต่ำและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Pernitsky and Edzwald, 2006)

2.6.2 Fluorescence excitation emission matrix (FEEM)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำแนกสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic matter, DOM) ในเชิงคุณภาพ ซึ่งจำแนกออกเป็น 5 ประเภทคือ

- Region I และ Region II มี excitation wavelengths ในช่วงสั้น <250 nm และ emission wavelengths ในช่วงสั้น <350 nm จะเป็นพวก Simple aromatic proteins เช่น tyrosine
- Region III มี excitation wavelengths ในช่วงสั้น <250 nm และ emission wavelengths ในช่วงยาว >350 nm จะเป็นพวก Fulvic acid – like materials
- Region IV มี excitation wavelengths ในช่วงกลาง 250 – 280 nm และ emission wavelengths ในช่วงสั้น <380 nm จะเป็นพวก Soluble microbial byproduct – like material
- Region V มี excitation wavelengths ในช่วงยาว >280 nm และ emission wavelengths ในช่วงยาว >380 nm จะเป็นพวก Humic acid – like organics ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การจำแนกสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix

ที่มา : Chen *et al*. (2003)

2.6.3 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เป็นเทคนิคสำหรับจำแนกหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล โดยใช้การดูดกลืนของรังสีอินฟาเรด ในช่วงสเปกตรัมคือ Middle Infrared Region Wavenumber (MIR) ที่ 4,000 - 400 cm^{-1} ซึ่งความถี่การดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง

Wavenumber (cm^{-1})	**หมู่ฟังก์ชัน**	**รายละเอียด**	
3,600 – 3,400	O-H stretching	3,650 – 3,590 cm^{-1} ความเข้มต่ำ พีคแหลมคม	แอลกอฮล์อิสระ
		3,400 – 3,200 cm^{-1} พีคกว้าง	แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน
		3,400 – 2,400 cm^{-1} ความเข้มสูงมาก พีคกว้างมาก	กรดคาร์บอกซิลิก
3,500 – 3,200	N-H stretching	3,200 – 3,400 cm^{-1} ความเข้มปานกลาง	เอมีนและเอมีต มี 2 แถบ
		3,200 – 3,400 cm^{-1} ความเข้มต่ำ	เอมีนและเอมีต มี 1 แถบ
3,300	=C-H stretching	ความเข้มสูงมาก	อัลไคน์
3,100 – 3,000	=C-H stretching	ความเข้มต่ำ พีคแหลมคม	อัลคีนและเบนซีน
3,000 – 2,800	C-H stretching	-	หมู่ CH_3, CH_2 และ CH ของ อัลเคน
2,850 – 2,780	C-H stretching	-	แอลดีไฮต์
2,250 – 2,225	C=N stretching	ความเข้มปานกลาง	ไนทริล
2,260 – 2,100	C=C stretching	ความเข้มต่ำ	อัลไคน์
1,820 – 1,760	C=O stretching	ความเข้มสูง	แอนไฮไดรต์ มี 2 แถบ
1,800	C=O stretching	ความเข้มสูง	กรดคลอไรด์
1,770	C=O stretching	ความเข้มสูง	แกมม่า – แลกโตน
1,735	C=O stretching	ความเข้มสูง	เอสเทอร์
1,725	C=O stretching	ความเข้มสูง	แอลดีไฮต์
1,715	C=O stretching	ความเข้มสูง	คีโตน
1,710	C=O stretching	ความเข้มสูง	กรดคาร์บอกซิลิก
1,690 – 1,650	C=O stretching	ความเข้มสูง	เอไมต์
1,650 – 1,600	C=O stretching	ความเข้มต่ำ	อัลคีน

ตารางที่ 2.7 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง (ต่อ)

Wavenumber (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด	
1,650 – 1,590	N-H bending	ความเข้มสูงถึงปานกลาง	1°เอมีน
1,650 – 1,550	N-H bending	ความเข้มต่ำ	2°เอมีน
1,620 – 1,590	N-H bending	ความเข้มสูง	1°เอมีต
1,550 – 1,510	N-H bending	ความเข้มสูง	2°เอมีต
1,600, 1,580, 1,500 และ 1,450	C=C stretching	-	เบนซีน
1,520 และ 1,530	NO_2 bending	ความเข้มสูง	สารประกอบไนโตร
1,485 – 1,450	C-H bending	-	หมู่ CH_2
1,450 – 1,375	C-H bending	-	หมู่ CH_2
1,400 – 1,000	C-F stretching	-	สารประกอบฟลูออไรด์
1,300 – 1,150	CH_2-X	-	สารประกอบเฮโลเจน
1,300 – 1,000	C-O stretching	-	อีเทอร์และเอสเทอร์
1,220	C-O stretching	-	ฟีนอล
1,150	C-O stretching	-	3°แอลกอฮอล์
1,100	C-O stretching	-	2°แอลกอฮอล์
1,050	C-O stretching	-	1°แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H	-	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, $RCH=CH_2$)
970	C-H	-	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H	-	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, $R_2C=CH_2$)
815	C-H	-	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, $R_2C=CHR$)
700 - 690	C-H	-	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่,cis)
750 และ 690	C-H	-	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่) เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบออโท)
780 และ 700	C-H	-	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบเมตา)
825 - 800	C-H	-	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบพารา)
800- 600	C-Cl	-	สารประกอบคลอไรด์
600 - 500	C-Br	-	สารประกอบโบรไมด์
500	C-I	-	สารประกอบไอโอไดด์

ที่มา : Silverstein *et al*. (1981)

จากปัญหาสีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากมีการปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะนั้น พบว่าสีเหล่านั้นเกิดจากสารอินทรีย์พวกลิกนิน แทนนิน กรดฮิวมิก แคโรทีน และฟีนอลิก ที่ปนเปื้อนจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (Neoh *et al*., 2012) ซึ่งมีงานวิจัยต่างๆได้ทำการวิเคราะห์กลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ดังงานวิจัยของ Kongnoo *et al*. (2012) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM พบพีคที่ตำแหน่ง Ex/Em = 315/415 nm และ 260/445 nm ซึ่งเป็นพวก humic และ fulvic acid – like substance ที่เป็นสาเหตุของการเกิดสีในน้ำทิ้ง งานวิจัยของ Baharuddin *et al*. (2011) ตรวจพบความถี่ 1,033 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching พบได้ในโพลีแซคคาไรด์ และแร่ดินเหนียว ความถี่ 1,130 และ 1,260 cm^{-1} พบได้ในลิกนิน (Matias *et al*., 2000) ความถี่ 1,449 และ 1,417 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H bending ความถี่ 1,650 cm^{-1} พบได้ในโปรตีนของเปลือกพืช ความถี่ 2,925 และ 2,855 cm^{-1} จัดเป็นพวก aliphatic methylene ที่พบได้ในไขมัน และความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน hydroxyl

งานวิจัยของ Alriols *et al*. (2009) วิเคราะห์ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจากทะลายปาล์มเปล่า โดยในลิกนินตรวจพบความถี่ 1,600, 1,515 และ 1,425 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic phenyl propane ความถี่ 3,400 และ 1,030 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic และ aliphatic hydroxyl ความถี่ 2,925, 2,850 และ 1,460 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-H aliphatic bonds ความถี่ 1,450 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม aromatic methyl ความถี่ 1,365 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม phenolic hydroxyl และ ความถี่ 1,715 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม non-conjugated carbonyl ส่วนเฮมิเซลลูโลสตรวจพบความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม O-H ความถี่ 2,920 และ 1,470 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-H stretching ของ methyl หรือ methylene ความถี่ 1,740 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม acetyl และ uronic ester ความถี่ 1,640 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C=O stretching และความถี่ 1,200 – 1,000 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-OH และ C-O-C

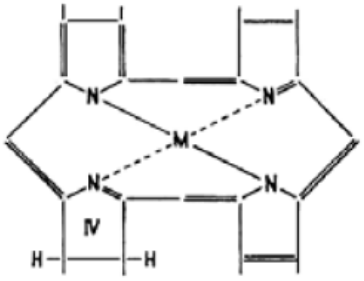
2.7 สารสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

รงควัตถุหรือสารสี (pigments) จะสามารถดูดกลืนแสงบางช่วงคลื่นไว้แล้วสะท้อนแสงบางช่วงคลื่น โดยในน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจะพบการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสี เช่น ลิกนิน แทนนิน แคโรทีน ฟีนอลิก และเมลานอยดิน (Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010; Rakamthong and Prasertsan, 2011) โดยจากการศึกษาสารสีธรรมชาติจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุลคือ

2.7.1 สารสีที่มีโครงสร้างของวงไพโรล 4 วง (tetrapyrrole)

สารที่มีโครงสร้างของวงไพโรล 4 วง หรือ วงพอร์ไพริน พบในพืชเรียกว่าคลอโรฟิลล์ เป็นรงควัตถุสีเขียวที่สำคัญที่สุดในพืชชั้นสูง พบในทุกส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งจะมีแมกนีเซียมอะตอมกับไนโตรเจนอะตอม 2 ตัวเกาะเกี่ยวโดยพันธะโควาเลนต์ ส่วนไนโตรเจนอีก 2 ตัว ต่างแบ่งอิเล็กตรอน 2 ตัวเพื่อใช้ร่วมกับแมกนีเซียมเกิดเป็นพันธะโคออดิเนทโควาเลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คลอโรฟิลล์ เป็นเอสเทอร์ละลายได้ในแอลกอฮอลล์ อีเทอร์ เบนซิน และอะซิโตน เมื่อบริสุทธิ์จะ

ละลายได้เล็กน้อยในปิโตรเลียมอีเทอร์ แต่ไม่ละลายในน้ำ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดและได้รับความร้อนสีเขียวของคลอโรฟิลล์จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล



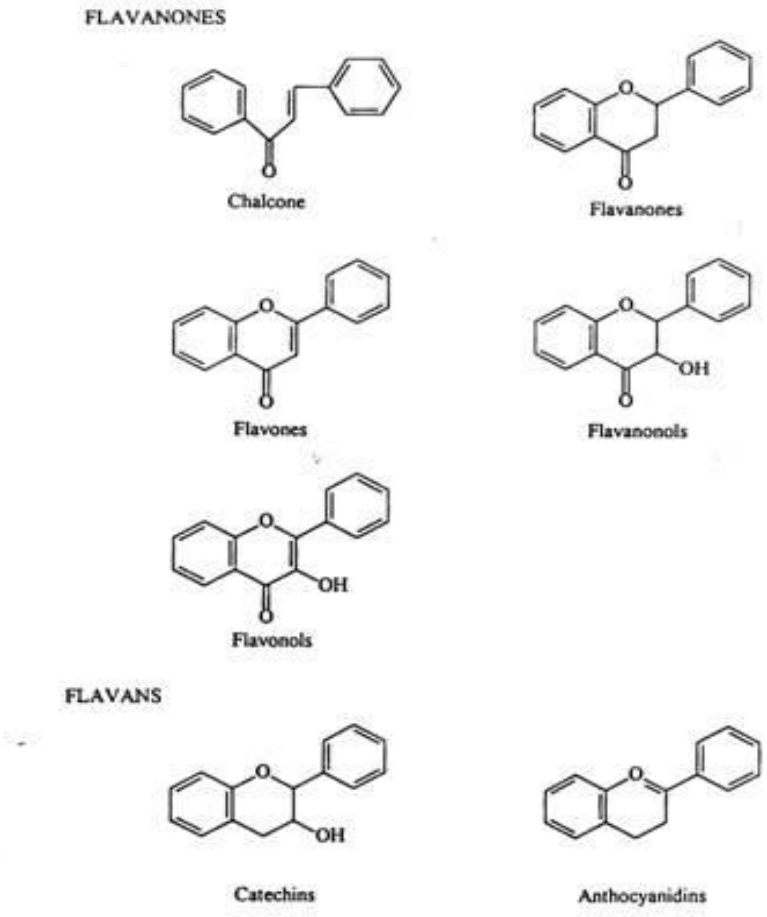
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของคลอโรฟิลล์
ที่มา : Lee (1983)

2.7.2 สารสีที่มีโครงสร้างแบบไอโซพรีน เช่น สารแคโรทีนอยด์

ไอโซพรีนเป็นหน่วยย่อยของแคโรทีนอยด์ ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอม 5 ตัว ซึ่งแคโรทีนอยด์จำนวนมากจะประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมถึง 40 ตัว หรือมีหน่วยไอโซพรีน 8 หน่วย จะพบว่าโครงสร้างจะเป็นแบบพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugated double bond) จำนวนมาก ยิ่งมีจำนวนมากสีจะเข้มขึ้น แคโรทีนอยด์แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักตามลักษณะโครงสร้าง และองค์ประกอบของโมเลกุลคือ ชนิดแรกเป็นไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่ไม่มีวงแหวน และชนิดที่มีวงแหวนที่ปลายด้านหนึ่งเพียงวงเดียว หรือชนิดที่มีวงแหวนที่ปลายทั้งสองข้าง ชนิดที่ไม่มีวงแหวนและมีวงแหวนทั้งสองข้าง ถ้าแบ่งครึ่งโมเลกุลแล้วจะได้สองส่วนที่เป็นภาพในกระจกเงาซึ่งกันและกัน ชนิดที่สองโครงสร้างโมเลกุลมีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุลเช่น หมู่ของไฮดรอกซิล อีพอกซี แอลดีไฮด์ หรือหมู่ของคีโตน รวมเรียกว่าแซนโทฟิลล์แคโรทีนอยด์ที่พบในพืชทั่วไปคือ บีตาแคโรทีน

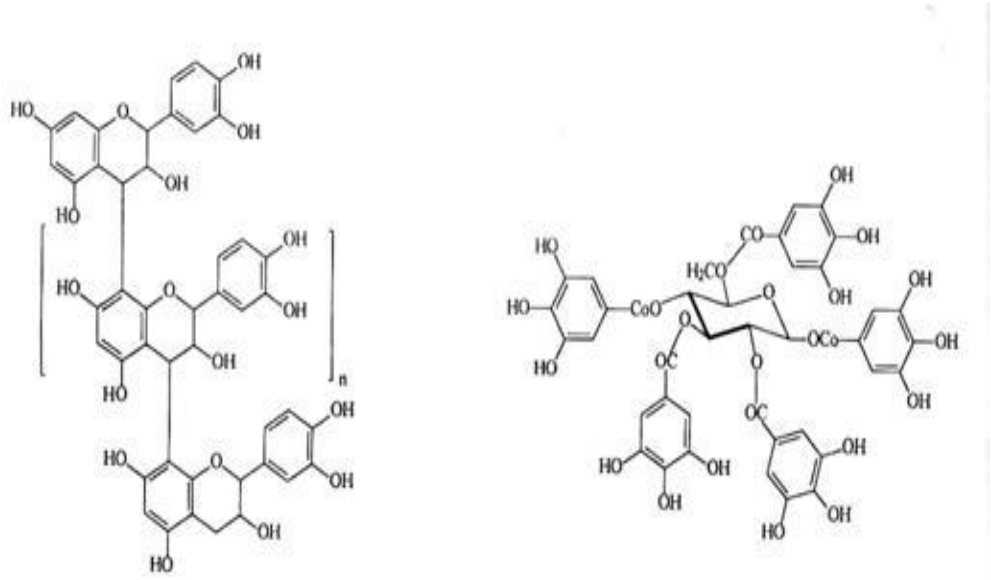
2.7.3 สารที่มีโครงสร้างแบบเบนโซไพราน

- ฟลาโวนอยด์และสารประกอบฟีนอลอื่น ฟลาโวนอยด์มีโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลประกอบด้วยวงเบนซีน 2 วงเชื่อมกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ฟลาวาโนน (flavanones) ซึ่งมีโครงสร้างแบบคีโทนอยู่ในโมเลกุล และฟลาวาน (flavans) ซึ่งมีโครงสร้างแบบแอลดีไฮด์หรือแอลกอฮลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6
- แอนโทไซยานิน เป็นสารสีที่มีหลายสีตั้งแต่สีน้ำเงิน ม่วง จนถึงสีแดง พบใน cell sap ของผัก ผลไม้ และดอกไม้ ละลายน้ำได้ดี โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยฟลาวีเลียมแคทไอออน (flavylium cation) โดยมีโมเลกุลของน้ำตาลเกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 แต่ก็พบน้ำตาลเกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 7 3′ 4′ หรือ 5′ เล็กน้อย น้ำตาลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป มอโน ได หรือ ไตรแซ็กคาไรด์ของน้ำตาลกลูโคส กาแลกโทส อะราบิโนส และไซโลส เมื่อน้ำตาลถูกไฮโดรไลซ์จะเหลืออะไกลโคน (aglycone) หรือที่เรียกว่าแอนโทไซยานิดิน (anthocyanidines)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารฟลาโวนอยด์
ที่มา: Elbe and Schwartz (1996)

- ฟลาโวนอยด์อื่นๆ เรียกว่า แอนโทแซนทีน (anthoxanthins) เป็นกลุ่มสารสีที่ไม่มีสีไปจนถึงมีสีเหลือง ฟลาโวนอยด์อื่นๆ ที่สำคัญคือ แทนนิน ที่เรียกชื่อแทนนินเพราะเป็นสารที่สามารถรวมกับโปรตีนหรือพอลิเมอร์อื่น เช่นพอลิแซคคาไรด์ได้ จะทำให้แทนนินมีโครงสร้างของสาร 2 ชนิด ที่ต่างกันคือ ชนิดแรกเป็น ลูโคแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ ส่วนชนิดที่สองเป็นโมเลกุลของกลูโคสต่อกับสารฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 2.7
- สารประกอบฟีนอลอื่น ประกอบด้วยสารประกอบกลุ่มควินโนน (quinones) เป็นสารที่มีโครงสร้างวงแหวนเบนซีนซึ่งอาจเป็นวงแหวนเดียว (monomer) หรือสองวง (dimmer) หรือหลาย ๆ วง (polymer) และสารประกอบกลุ่มแซนโทน (xanthones) ซึ่งเป็นสารสีที่ให้สีเหลืองแต่มีโครงสร้างไม่เหมือนกับสารฟลาโวน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของแทนนิน
ที่มา: Elbe and Schwartz (1996)

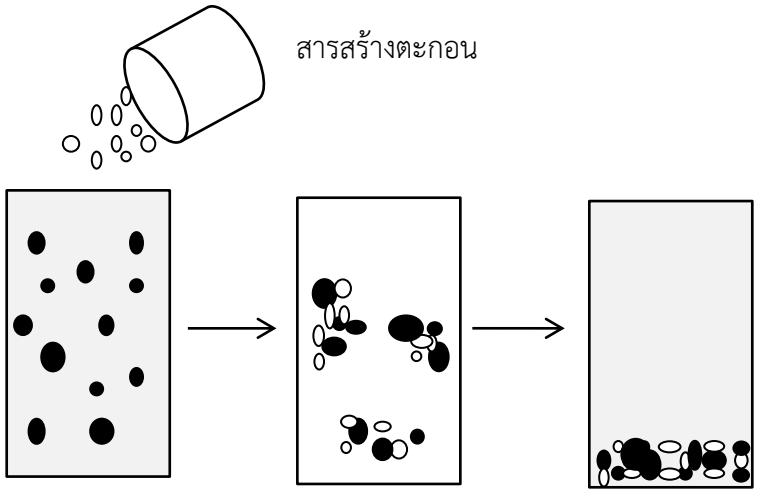
2.7.4 สารสีกลุ่มบีตาไซยานินหรือบีตาเลนแอนโทไซยานิน

- บีตาไซยานิน เป็นอนุพันธ์ของบีตานิดิน (betanidin) และไอโซบีตานิดิน (isobetanidine) และเมื่อเกาะกับน้ำตาลที่แตกต่างกันไปจะได้บีตาไซยานินแตกต่างกันไป คือ ถ้าน้ำตาลที่เกาะที่หมู่ R เป็นกลูโคสจะได้บีตานิน และไอโซบีตานิน แต่ถ้าน้ำตาลที่เกาะที่หมู่ R เป็น 2 กลูโคโรนิกแอซิคกลูโคส จะได้อะมารานทีน (amaranthin)
- บีตาเลนประกอบด้วยสารสี 2 กลุ่มคือ บีตาไซยานินมีสีแดงและบีตาแซนทินให้สีเหลือง พบในผักโขม (amaranth) พีเอชไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนสี เป็นสารที่ละลายน้ำได้ และอยู่ในแวคคิวโอลของเซลล์พืชในรูปของเกลือที่มีทั้งสองประจุอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน (สุจิตรา (เลิศพฤกษ์) รตนะมโน, 2555)

2.8 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นการเติมสารเคมี เพื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็ก ตกตะกอนได้ยาก เกิดการรวมตัวจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก (Floc) เพื่อให้สามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดความขุ่นในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ กำจัดสี กลิ่น รส และสารอื่นๆที่ปนเปื้อนในน้ำ

คอลลอยด์ คือ อนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นเวลานาน เนื่องจากมีเสถียรภาพสูง ซึ่งจะมีทั้งอนุภาคที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และ อนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อนุภาคที่ชอบน้ำ คืออนุภาคที่มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ทำให้ไม่จับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เช่น โปรตีน สบู่ ผงซักฟอก ส่วนอนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ คืออนุภาคที่สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่า เช่น ดินเหนียว ทอง และโลหะอื่นๆ



รูปที่ 2.8 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

2.8.1 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า สารสร้างตะกอน หรือ Coagulant เป็นสารที่เติมลงไปในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดย Coagulant ที่นิยมใช้คือ สารส้ม $Al_2(SO_4)_3.14H_2O$ (Aluminium sulfate) เนื่องจากมีราคาถูก (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2547) และยังมีสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันตัวอื่นๆอีก ดังนี้

- Hydrolysing metallic salts เช่น Ferric chloride, Ferric sulphate, Magnesium chloride และ Alum
- Pre – hydrolyzing metallic salts เช่น Polyaluminium chloride (PACl), Polyferric chloride (PFCl), Polyferrous sulphate (PFS), Polyaluminium ferric chloride (PAFCl) และ Polyaluminium sulphate (PAS)
- Synthetic cationic polymers เช่น Aminomethyl polyacrylamide, Polyalkylene, Polyamine, Polyethylenimine และ Polydiallydimethyl ammonium chloride (poly - DADMAC) (Verma *et al*., 2012)

โดยสารสร้างตะกอนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือสารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่มีคุณสมบัติ ข้อดี และข้อจำกัดดังนี้

1) สารส้ม หรือ Aluminium Sulfate (Alum) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (a) มีสูตรโครงสร้าง คือ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14\ H_2O$ ซึ่งเมื่อสารส้มละลายในน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารส้มกับความเป็นด่างในน้ำดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 .14\ H_2O + 6\ H_2O \longrightarrow 2Al(OH)_3 \downarrow + 3\ H_2SO_4 + 14\ H_2O$$

$$3\ H_2SO_4 + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 3Ca\ SO_4 + 6\ H_2CO_3$$

$$6H_2CO_3 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

$$Al_2(SO_4)_3\ 14H_2O + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 6CO_2 + 14H_2O$$

เกิดเป็นตะกอน $Al(OH)_3$ และรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำตกตะกอนสู่ด้านล่าง

- ข้อดี คือ ราคาถูก และง่ายสำหรับประยุกต์ใช้
- ข้อจำกัด คือ กำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้น้อย ต้องมีความเป็นด่างในน้ำที่เพียงพอ ฟล็อกมีน้ำหนักเบา และมีการหลงเหลือของอะลูมิเนียม

2) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ Polyaluminium chloride (PACl) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (b) มีสูตรโครงสร้างคือ $Al_2(OH)_3Cl_3$ ซึ่งเมื่อโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ละลายในน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์กับความเป็นด่างในน้ำดังนี้

$$Al_2(OH)_3Cl_3 \longrightarrow Al_2(OH)_3^{+3} + 3Cl$$

$$Al_2(OH)_3^{+3} + 3Cl^- + 3H_2O \longrightarrow Al_2(OH)_6 + 3HCl$$

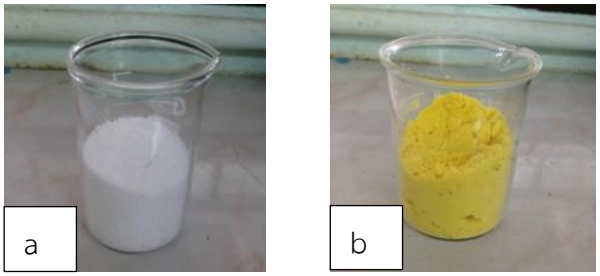
$$2HCl + Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow CaCl_2 + 2H_2CO_3$$

$$2H_2CO_3 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O$$

$$2Al_2(OH)_3Cl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 4Al(OH)_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2$$

เกิดเป็นตะกอน $Al(OH)_3$ เช่นเดียวกับสารส้ม และรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำตกตะกอนสู่ด้านล่าง

- ข้อดี คือ ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ต้องการความเป็นด่างต่ำ มีประสิทธิภาพในช่วงพีเอชที่กว้าง คือ 5 – 8 และใช้เวลาในการตกตะกอนน้อย
- ข้อจำกัด คือ อะลูมิเนียมที่หลงเหลือจะมีฤทธิ์กัดกร่อน (De Dietrich Process systems, 2014; Gilbert *et al*., 1976)



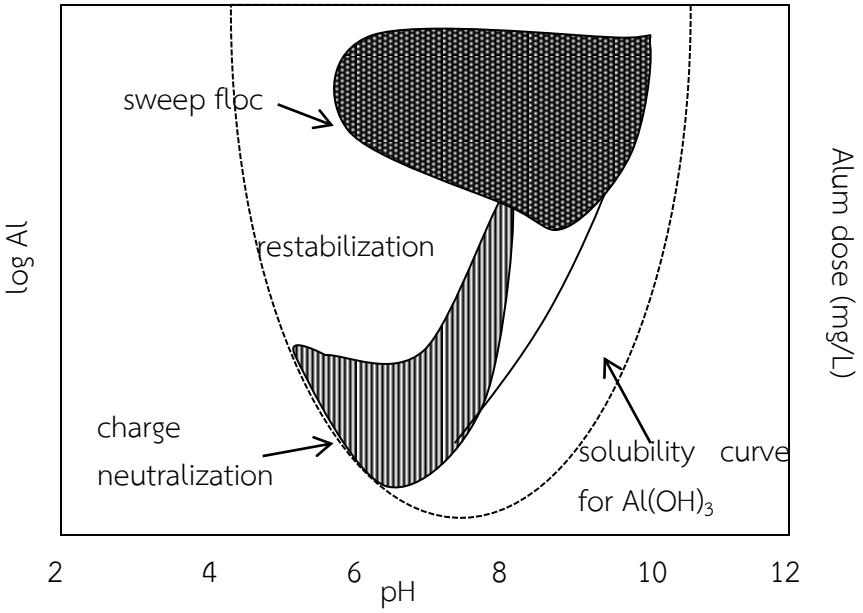
รูปที่ 2.9 สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการวิจัย (a) สารส้ม (b) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

2.8.2 กลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

1) กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and charge neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มที่มีประจุบวก ไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งมักมีประจุเป็นลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอน ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งจะควบคุมการทำงานให้ดีนั้นยาก เพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไปกระบวนการโคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิว

อนุภาคมาก ทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวก และเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

2) กลไกแบบกวาด (Sweep coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินพอจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้ $Al(OH)_3$ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอ จนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึกของ $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง



รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นของสารส้มและค่าพีเอชสำหรับการเกิดกลไกต่างๆใน
กระบวนการโคแอกกูเลชัน
ที่มา: ดัดแปลงจาก Amirtharajah and Mill (1982)

3) กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุและ กลไกแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองไม่เด่นชัด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่จะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาด (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน

1) ค่าความเป็นกรด – ด่าง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีของสารสร้างตะกอนแต่ละชนิด
2) เกลือแร่ต่างๆ การจับตัวของฟล็อคจะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการมีอนุมูลของซัลเฟตหรือฟอสเฟต และอิออนต่างๆ
3) ความขุ่น เกิดจากอนุภาคที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ โดยสามารถใช้สารสร้างตะกอนช่วยให้ตกตะกอนได้ แต่ความขุ่นไม่ได้เป็นแปรผันตามความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน
4) ชนิดของสารเคมีสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ที่ต่างกัน โดยทั่วไปจะนิยมใช้เป็นสารส้ม เนื่องจากมีราคาถูก
5) อุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิแปรผกผันกับค่าความหนืด นั่นคือ ถ้าน้ำมีอุณหภูมิลดลงจะทำให้น้ำมีความหนืดเพิ่ม ซึ่งความหนืดนี้จะไปเพิ่มความเสียดทาน ทำให้ฟล็อคตกตะกอนช้า
6) ปริมาณสารสร้างตะกอน ปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ดังนั้นจึงควรทำจารเทสต์เพื่อหาค่าเหมาะสมก่อน
7) ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 – 5 μm มีความเหมาะสม เนื่องจากมีโอกาสสัมผัสและรวมตัวเป็นฟล็อคขนาดใหญ่ได้อย่างหนาแน่น
8) การกวน ในช่วงแรกของกระบวนการควรมีการกวนผสมที่สามารถทำให้สารสร้างตะกอนกระจายอย่างทั่วถึง เพื่อให้สัมผัสกับอนุภาคในน้ำ หลังจากนั้นจึงลดความเร็ว เพื่อให้อนุภาคสามารถจับตัวกันเป็นฟล็อคขนาดใหญ่ ก่อนหยุดกวน

ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ข้อดี	ข้อจำกัด
– ทำลายเสถียรภาพสารแขวนลอยขนาดใหญ่ได้ – กำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้ดี – ราคาไม่สูงและสามารถใช้งานได้ง่ายสำหรับสารสร้างตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ – ถ้าใช้สารสร้างตะกอนตามธรรมชาติจะย่อยสลายทางชีวภาพและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ	– บางครั้งการเพิ่มอุณหภูมิจะลดประสิทธิภาพในกระบวนการโคแอกกูเลชัน – สารสร้างตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของค่าพีเอชและจะทำให้เกิดตะกอนปริมาณมาก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Wu *et al*. (2010)

2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจนา ธนิกกุล (2553) ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติที่มีค่าพีเอช 9.76 – 9.82 ความขุ่น 179.67 – 249.00 NTU และสี 71.26 – 146.59 SU ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยได้มีการหาความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสม พบว่าการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 300 mg/L พีเอช 8 มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด เนื่องจากหากเติมความเข้มข้นที่น้อยจะทำให้เกิดตะกอนน้อย ประสิทธิภาพการบำบัดจะต่ำ ส่วนค่าพีเอช เมื่อเติมสารส้มในสภาวะเป็นด่าง อะลูมิเนียมจะอยู่ในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเกาะเป็นสายยาวและมีลักษณะเป็นวุ้น ทำให้เกิดกลไกการสะเทินประจุที่ผิวคอลลอยด์และดูดซับบนอนุภาค อนุภาคคอลลอยด์จึงตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ดี และเมื่อเปลี่ยนสารสร้างตะกอนเป็นโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าจะได้ความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมคือ 800 mg/L พีเอช 8 ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่าการใช้สารส้ม แต่จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสีที่ดีกว่า

บัสรี หะยีปะดอเห็ง และ ประธาน กรกิติประภา (2552) บำบัดน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีลักษณะสมบัติคือ พีเอช 8.32 ความขุ่น 11.5 NTU ค่าการนำไฟฟ้า 3.27 UV_{254} 2.301 cm^{-1} ซีโอดี 213.12 mg/L และ ของแข็งแขวนลอย 0.275 mg/L เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 2 g/L พีเอช 5 พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นดีที่สุด แต่ไม่สามารถกำจัดสีออกไปได้ เนื่องจากสีในน้ำทิ้งเกิดจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก จึงนำไปบำบัดต่อด้วยเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน

วาริท เจาะจิตต์ (2541) บำบัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสิ่งทอ ซึ่งจัดว่าเป็นสีจริง น้ำทิ้งมีค่าพีเอช ซีโอดี และความขุ่นเฉลี่ย 9.21, 224 mg/L และ 40.1 NTU ตามลำดับ เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันในสภาวะที่เหมาะสมด้วยสารสร้างตะกอน 3 ชนิด พบว่าการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 850 mg/L พีเอช 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 73.1, 95.3 และ 32.8 ตามลำดับ ส่วนการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3,800 mg/L พีเอช 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 72.1, 98.5 และ 31.4 ตามลำดับ และการใช้เบนโทไนท์ความเข้มข้น 4,000 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 72.1, 75.9 และ 32.1 ตามลำดับ เห็นได้ว่าในการบำบัดสี การใช้เฟอริกคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด อีกทั้งมีการใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และเบนโทไนท์

วีระนุช บุญรุ่ง (2553) บำบัดสารอินทรีย์และสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ซึ่งมีค่าพีเอช ความขุ่น สี และซีโอดีประมาณ 12.05 – 12.63, 108 – 177 NTU, 117 – 175 SU และ 1,689 – 2,667 mg/L เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าการใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 2.56 g/L พีเอช 7.2 จะมีประสิทธิภาพบำบัดความขุ่น สี และซีโอดีได้ดี คือร้อยละ 94.02, 76.28 และ 42.96 ตามลำดับ และเมื่อใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 4 g/L พีเอช 7.4 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น สี และซีโอดีได้ร้อยละ 96.12, 86.75 และ 54.18 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ดีกว่าการใช้สารส้ม แต่จะต้องใช้ความเข้มข้นของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สูงกว่า

ศักดิ์ชัย ชื้อวัฒนานุกูร (2539) ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีประเภทสีน้ำ โดยน้ำเสียมีสีน้ำเงินเข้ม สีดำและสีเขียวอ่อน ค่าพีเอช 7.17 – 7.45 ค่าของแข็งแขวนลอย 755 – 1,427 mg/L ความขุ่น 3,850 – 6,050 NTU ซีโอดี 1,172 - 1,685 mg/L บีโอดี 24 – 32 mg/L เมื่อนำมาบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 500 mg/L ควบคุมพีเอช 7 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าความเข้มสีน้อยกว่าร้อย 2 ของผลิตภัณฑ์สี ปริมาณของแข็งแขวนลอย 2 mg/L ความขุ่น 13 NTU ซีโอดี 318 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดสี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และซีโอดีประมาณร้อยละ 99.75, 99.8, 99.7 และ 76.8 ตามลำดับ

สุปรีดา วัชรจิรโสภณ และ นันทนา ดาโอะ (2554) บำบัดสารอินทรีย์และสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีลักษณะสมบัติคือ พีเอช 8.6 ความขุ่น 34 NTU ซีโอดี 1,920 mg/L บีโอดี 78 mg/L สี 112.8 mg/L และ ของแข็งแขวนลอย 0.33 mg/L เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 70 mg/L พีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ดี แต่พบว่าไม่สามารถกำจัดสีได้ จึงมีการเติมโพลิเมอร์ชนิดแคทไอออนและแอนไอออนลงไปร่วมกับโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 70 mg/L กลับพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไม่เพิ่มขึ้นมากนัก จึงควรใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เพียงชนิดเดียวเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

Ahmad *et al*. (2003) บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรน ซึ่งมีการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน จำนวน 2 ถัง โดยใช้สารส้ม แล้วต่อด้วยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวทเต็ดคาร์บอน ก่อนเข้าสู่เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน และรีเวิร์สออสโมซิส พบว่าน้ำเสียมีลักษณะสมบัติ คือ มีค่าพีเอช 4.7 น้ำมันและไขมัน 4,000 mg/L บีโอดี 25,000 mg/L ซีโอดี 50,000 mg/L ของแข็งทั้งหมด 40,500 mg/L และของแข็งแขวนลอย 18,000 mg/L เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถบำบัดซีโอดีได้โดย ถังแรกมีค่าลดลงร้อยละ 35 ถังที่สองลดลง ร้อยละ 46.8 และเมื่อผ่านทั้งสองถัง รวมกับกระบวนการดูดซับจะลดค่าความขุ่น ซีโอดี และบีโอดีได้ร้อยละ 97.9 , 56, 71 ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถดูดซับกลิ่นและสีได้ จากนั้นจึงนำเข้าสู่เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและรีเวิร์สออสโมซิส พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดนี้มีคุณภาพที่ดีจนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในบอยเลอร์ เพื่อใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มได้

Ahmad *et al*. (2006) บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้เมมเบรนสำหรับนำกลับมาใช้ผลิตน้ำดื่ม ซึ่งมีการบำบัดขั้นต้นโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยสารส้ม 0.05 v/v ร่วมกับ anionic polymer 0.015 v/v ที่พีเอช 5.5 - 6.5 พบว่าสามารถบำบัดสี กลิ่น ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 56.8 ซีโอดีได้ร้อยละ 70 อีกทั้งโลหะต่างๆ และเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นไปกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและรีเวิร์สออสโมซิสจะสามารถนำกลับมาใช้ทำน้ำสำหรับดื่มได้

Hassan and Puteh (2007) ทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยสารส้ม ที่ความเข้มข้น 8 g/L. ควบคุมพีเอช 7 พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอย และซีโอดีได้ดี คือบำบัดได้ร้อยละ 99.45, 98.6 และ 49.24 ตามลำดับ ซึ่งในช่วงพีเอชที่เป็นกรด หรือเป็นด่าง จะทำให้สารส้มมีประสิทธิภาพใน

การบำบัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสภาวะเป็นกรดจะพบ Al^{3+} ที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำและไม่ตกตะกอนอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนสภาวะเป็นด่างจะพบประจุลบของ $Al(OH)_4^-$ ในรูปละลายน้ำและไม่ตกตะกอนเช่นกัน แต่ในสภาวะเป็นกลางจะพบ ฟล็อก hydroxide ของสารส้มที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนเป็น sweep floc ได้ดีกว่า

Wah *et al*. (2002) ทำการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีลักษณะสมบัติ คือ ซีโอดี 1,448 mg/Lของแข็งแขวนลอย 700 mg/L ความขุ่น 1,113 NTU และ สี 900 Pt-Co เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่ามีค่าซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และ สีหลงเหลืออยู่เท่ากับ 800 mg/L, 150 mg/L, 395 NTU และ 380 Pt-Co ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำไปบำบัดต่อด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และ สีเท่ากับร้อยละ 49.5, 100, 100 และ 76.9 ตามลำดับ

2.9 การบำบัดโดยดิน (Land treatment)

ดิน คือ วัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ หินและแร่ จากอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมทั้งภูมิอากาศ ระยะเวลา เกิดเป็นดินหลายชนิดบนพื้นผิวโลก เป็นที่ยึดเหนี่ยวและเจริญเติบโตของพืช รวมถึงเป็นแหล่งอาหารและน้ำแก่สิ่งมีชีวิต (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556)

2.9.1 ชั้นของดิน

ดินจะประกอบด้วยหน้าดินเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชั้นจะมีสี ความพรุน ความหนาแน่น และประเภทของดินที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) ชั้นโอ (O Horizon) เป็นดินชั้นบนสุดมักมีสีคล้ำเนื่องจากประกอบด้วยอินทรียวัตถุ (Organic) หรือ ฮิวมัส ซึ่งเป็นซากพืชซากสัตว์ ซึ่งทำให้เกิดความเป็นกรด ดินชั้นโอส่วนใหญ่จะพบในพื้นที่ป่า ส่วนในพื้นที่การเกษตรจะไม่มีชั้นโอในหน้าตัดดิน เนื่องจากถูกไถพรวนไปหมด
2) ชั้นเอ (A Horizon) เป็นดินชั้นบน (Top soil) เป็นส่วนที่มีน้ำซึมผ่าน ดินชั้นเอส่วนใหญ่ประกอบด้วยหินแร่และอินทรียวัตถุที่ย่อยสลายสมบูรณ์แล้วอยู่ด้วย ทำให้ดินมีสีเข้ม ในพื้นที่เกษตรกรรมดินชั้นเอจะถูกไถพรวน เมื่อมีการย่อยสลายของรากพืชและมีการสะสมอินทรียวัตถุ โดยปกติโครงสร้างของดินจะเป็นแบบก้อนกลม แต่ถ้าดินมีการอัดตัวกันแน่น โครงสร้างของดินในชั้นเอจะเป็นแบบแผ่น
3) ชั้นอี (E Horizon) หรือ ชั้นชะล้าง คือ เป็นชั้นดินที่มีสีซีดจาง มีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยกว่ากว่าชั้น A และมักจะมีเนื้อดินหยาบกว่าชั้น B ที่อยู่ตอนล่างลงไป
4) ชั้นบี (B Horizon) เป็นชั้นดินล่าง (subsoil) เนื้อดินและโครงสร้างเป็นแบบก้อนเหลี่ยมหรือแท่งผลึก เกิดจากการชะล้างแร่ธาตุต่างๆ ของสารละลายต่างๆ เคลื่อนตัวผ่านชั้นเอลงมามาสะสมในชั้นบี ในเขตภูมิอากาศชื้น ดินในชั้นบีส่วนใหญ่จะมีสีน้ำตาลปนแดงเนื่องจากการสะสมตัวของเหล็กออกไซด์
5) ชั้นซี (C Horizon) เกิดจากการผุพังของหินกำเนิดดิน (Parent rock) ไม่มีการตกตะกอนของวัสดุดินจากการชะล้าง และไม่มีการสะสมของอินทรียวัตถุ

6) ชั้นอาร์ (R Horizon) เป็นชั้นของวัตถุต้นกำเนิดดิน หรือ หินพื้น (Bedrock)

2.9.2 การจำแนกประเภทของดิน

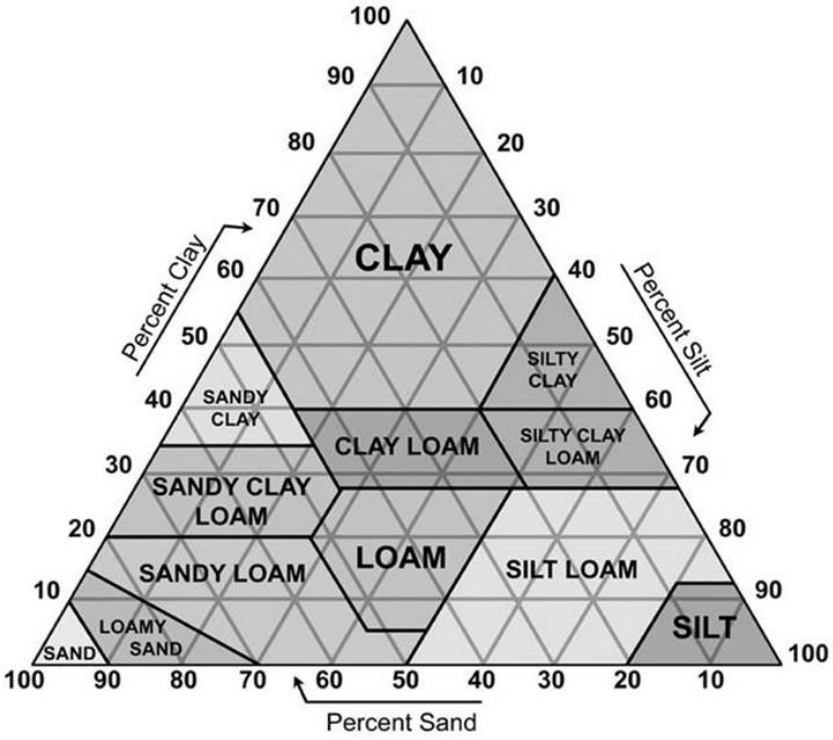
1) การจำแนกประเภทของดินตามขนาดเม็ดดินนั้น นิยมใช้ในงานเกษตรกรรม สามารถแบ่งขนาดเม็ดดินได้ 3 กลุ่มคือ ขนาดใหญ่ เรียกว่า อนุภาคขนาดทราย (sand) ขนาดกลาง เรียกว่า อนุภาคตะกอนทรายหรือทรายแป้ง (silt) ขนาดเล็ก เรียกว่า อนุภาคขนาดดินเหนียว (clay) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินจะแสดงในตารางที่ 2.9 จะได้ดินประเภทต่างๆ ดังนี้

- กลุ่มดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 85 อนุภาคจะเกาะกันแบบหลวมๆ เมื่อสัมผัสดินแห้งจะรู้สึกสากมือ เป็นดินที่ระบายน้ำได้ดี แต่ความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ น้ำซึมผ่านรวดเร็ว ดินในกลุ่มนี้ได้แก่ ดินทราย ดินทรายปนดินร่วน
- กลุ่มดินร่วน เป็นดินที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้งและดินเหนียว เป็นดินที่ค่อนข้างละเอียดนุ่มมือ เป็นดินที่เหมาะสมในการเกษตร ระบายน้ำได้ดี ดินในกลุ่มนี้ได้แก่ ดินร่วน ดินร่วนปนทราย ดินร่วนปนทรายแป้ง ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง ดินทรายแป้ง
- กลุ่มดินเหนียว เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป เป็นดินเนื้อละเอียด เมื่อแห้งจะเกาะตัวเป็นก้อน เมื่อเปียกจะมีลักษณะเหนียวติดมือ ระบายน้ำได้ไม่ดี ดินในกลุ่มนี้ได้แก่ ดินเหนียว ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทรายแป้ง
  หลังจากนั้นจึงนำองค์ประกอบของดินทราย ดินตะกอนทราย และดินเหนียวที่คัดแยกได้มาเทียบกับแผนภูมิสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.11 เพื่อจำแนกประเภทของดิน

ตารางที่ 2.9 การจำแนกดินตามขนาดเม็ดดิน

กลุ่มขนาด	**เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)**	
	ระบบสหรัฐอเมริกา (USDA)	**ระบบสากล (ISSS)**
ทราย (very coarse sand)	2.00 – 1.00	-
ทรายหยาบ (Coarse sand)	1.00 – 0.05	2.00 – 0.20
ทรายขนาดปานกลาง (medium sand)	0.50 – 0.25	-
ทรายละเอียด (fine sand)	0.25 – 0.10	0.20 – 0.02
ทรายละเอียดมาก (very fine sand)	0.10 – 0.05	-
ทรายแป้ง (silt)	0.05 – 0.002	0.02 – 0.002
ดินเหนียว (clay)	< 0.002	< 0.002

ที่มา : ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ (2541)



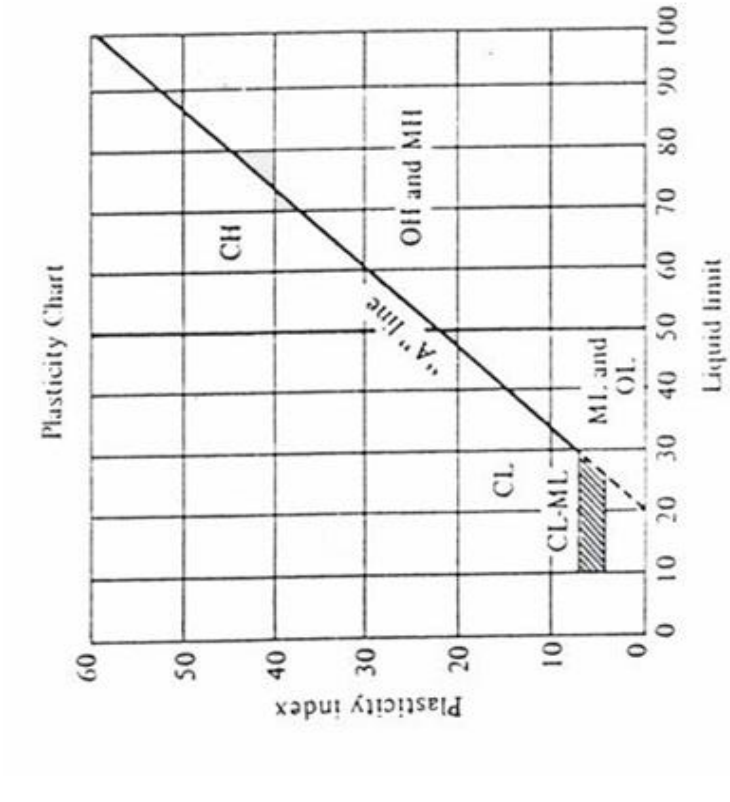
รูปที่ 2.11 แผนภูมิสามเหลี่ยม (Triangular Soil Classification Chart)
ที่มา : Ohio EPA (2015)

2) การจำแนกประเภทของดินโดยระบบ Unified (ASTM D-2487) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากกว่าวิธีอื่นๆ เหมาะกับงานวิศวกรรมทั่วไป โดยจะใช้อักษรภาษาอังกฤษเป็นสัญลักษณ์แทนกลุ่มดิน คือ G (gravel) เป็นพวกกรวด S (sand) พวกทราย M (silt) พวกตะกอนทราย C (clay) พวกดินเหนียว O (organic) พวกสารอินทรีย์ Pt (peat) มีสารอินทรีย์สูง W (well graded) มีขนาดคละกันดี P (poorly graded) มีขนาดคละกันไม่ดี L (low liquid limit) L.L. น้อยกว่าร้อยละ 50 H (high liquid limit) L.L. มากกว่าร้อยละ 50 ดังแสดงในตารางที่ 2.10 ในการจำแนกประเภทดินจะแบ่งตามขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดิน แต่ดินเม็ดละเอียดมีขนาดเล็กมาก จะต้องจำแนกตามคุณสมบัติความเหนียวของดิน โดยใช้ค่าดัชนีความเหนียว (P.I.) และพิกัดความเหนียว (L.L.) แล้วนำไปเขียนจุดแผนภูมิความเหนียว (plasticity chart) ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การจำแนกประเภทดินโดยระบบ Unified

<table>
<tr><td colspan="8">ดินพวกเม็ดหยาบ
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50</td></tr>
<tr><td colspan="3">ทราย
ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าครึ่งหนึ่งของดินเม็ดหยาบ</td><td colspan="5">กรวด
ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของดินเม็ดหยาบ</td></tr>
<tr><td>ทรายมีเม็ดละเอียดปน</td><td colspan="2">ทรายสะอาดมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย</td><td colspan="2">กรวดมีเม็ดละเอียดปน</td><td colspan="2">กรวดสะอาดมีเม็ดละเอียดปนอยู่บ้างหรือไม่มีเลย</td></tr>
<tr><td>SM</td><td>SP</td><td>SW</td><td>GC</td><td>GM</td><td>GP</td><td>GW</td></tr>
<tr><td>ทรายมีตะกอนทรายปน
กรวด ตะกอนทรายผสมกัน</td><td>ทรายมีขนาดคละกันไม่ดี
ทรายปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนบ้าง
หรือไม่มี</td><td>ทรายมีขนาดคละกันดี
ทรายปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนบ้าง
หรือไม่มี</td><td>กรวดมีดินเหนียวปน
กรวด ทราย ดินเหนียวผสมกัน</td><td>กรวดมีตะกอนทรายปน
กรวด ทราย ตะกอนทรายผสมกัน</td><td>กรวดมีขนาดคละกันไม่ดี
กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปนบ้าง
หรือไม่มี</td><td>กรวดมีขนาดคละกันดี
กรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปนบ้าง
หรือไม่มี</td></tr>
<tr><td colspan="8">ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 5: GW GP SW SP
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 12: GM GC SM SC
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่างร้อยละ 5 – 12: คาบเกี่ยวกัน ใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว</td></tr>
<tr><td>Atterberg limit อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. น้อยกว่า 4</td><td rowspan="2">ไม่เข้าเกณฑ์ SW</td><td rowspan="2">$C_u = D_{60}/D_{10}$ มากกว่า 6
$C_c = D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$ อยู่ระหว่าง 1 -3</td><td>Atterberg limit อยู่เหนือเส้น A หรือ P.I. มากกว่า 7</td><td>Atterberg limit อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. น้อยกว่า 4</td><td rowspan="2">ไม่เข้าเกณฑ์ GW</td><td rowspan="2">$C_u = D_{60}/D_{10}$ มากกว่า 4
$C_c = D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$ อยู่ระหว่าง 1 -3</td></tr>
<tr><td>Atterberg limit อยู่ในเขตที่เรียกว่าคาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว</td><td colspan="2">Atterberg limit อยู่ในเขตที่เรียกว่าคาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 4 ตัว</td></tr>
</table>

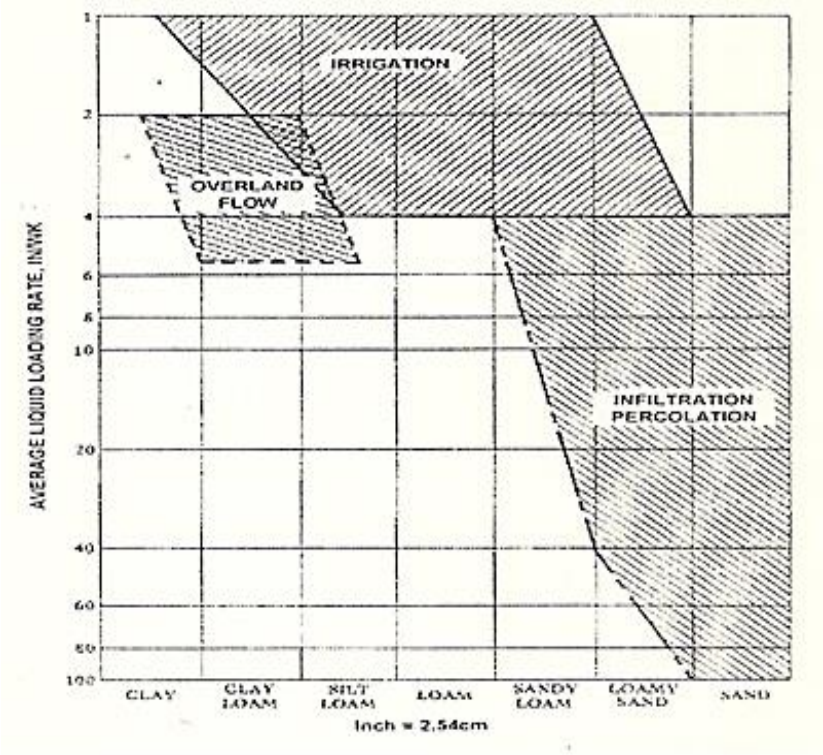
ตารางที่ 2.10 การจำแนกประเภทดินโดยระบบ Unified (ต่อ)

	ดินพวกเม็ดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 50					
	ตะกอนทรายและดินเหนียว L.L. มากกว่า 50			ตะกอนทรายและดินเหนียว L.L. น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50		
PT	OH	CH	MH	OL	CL	ML
โคลนสีดำ และดินอินทรีย์สูงๆ	ดินเหนียวอินทรีย์ มีความเหนียวปานกลางถึงสูง ตะกอนทรายอินทรีย์	ดินเหนียวอินทรีย์มีความเหนียวสูง ดินเหนียวมีความหนืดสูง	ตะกอนทรายอินทรีย์และทรายละเอียด หรือตะกอนทรายปน ไม้ก๊าหรือดินเบา ตะกอนทรายที่ยืดหยุ่น	ตะกอนทรายอินทรีย์และดินเหนียวปนตะกอนทรายอินทรีย์ มีความเหนียวต่ำ	ตะกอนทรายอินทรีย์มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวปนกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน	ตะกอนทรายอินทรีย์และทรายละเอียดมาก หินฝุ่น ทรายละเอียดปน ตะกอนทราย หรือดินเหนียวเล็กน้อย
แยกได้โดยสี กลิ่น และสัมผัสลักษณะเนื้อดิน						

ที่มา: ดัดแปลงจาก สราวุธ จริตงาม (2545) และ เชิดพันธ์ อมรกุล และ สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ (2558)

2.9.3 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการบำบัดโดยดิน (Land Treatment)

การบำบัดน้ำเสียโดยดินเป็นการบำบัดน้ำเสียบนพื้นดินใน พื้นที่ว่างเปล่าที่ไม่ได้ใช้ทำกิจกรรมหรือใช้ในพื้นที่ทางการเกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียบนดินนี้เป็นวิธีการบำบัดที่ประหยัดค่าใช้จ่าย ดูแลรักษาง่าย เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะปราศจากสารพิษอันตรายหรือผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว และควรมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการบำบัด นอกจากนี้การบำบัดโดยดินยังเป็นประโยชน์สำหรับการเพาะปลูกพืชต่างๆ (พัชร สนั่นพัฒนพงศ์, 2555) โดยการบำบัดโดยดินจะแบ่งการบำบัดเป็น 3 ระบบ คือระบบอัตราการไหลช้า ระบบอัตราการไหลซึมเร็ว และระบบน้ำไหลนอง ในการเลือกใช้ระบบต่างๆจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และลักษณะดินในพื้นที่ และเลือกได้จากความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกของน้ำกับชนิดของดินสำหรับการบำบัด (Polprasert C. , 2007) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

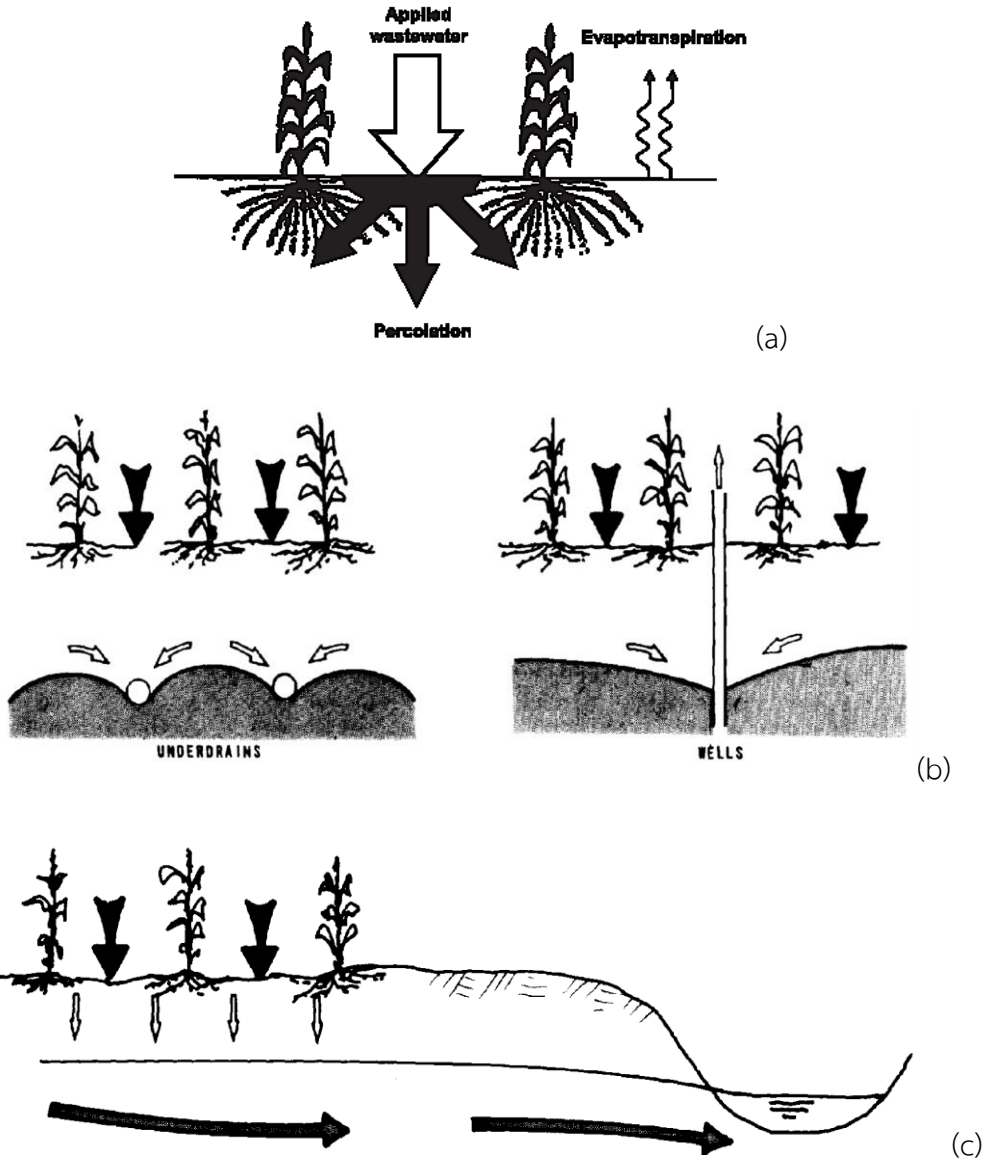


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาระบรรทุกของน้ำ
ที่มา: U.S.EPA (1976)

1) ระบบอัตราการไหลช้า (Slow – rate systems, Irrigation) วิธีนี้เป็นการรดน้ำปล่อยให้น้ำไหลซึมลงดินและเกิดการคายน้ำออกจากระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยจะมีพืชต่างๆเช่น ข้าวโพด ผักต่างๆ หรือต้นไม้ทั่วๆไปอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียนี้ โดยทั่วไปน้ำเสียที่ทำการบำบัดด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงบริเวณที่จะทำการบำบัด ลักษณะของน้ำเสีย และความสามารถของพื้นที่ที่จะรองรับปริมาณน้ำเสีย บางแห่งอาจจำเป็นต้องมีการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นแรกก่อน และอาจต้องมีการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำ

เสียชนิดเกือบสมบูรณ์ เช่น มีระบบการบำบัดขั้นต้น มีระบบบำบัดขั้นที่สอง หรือมีระบบบำบัดขั้นสูงๆต่อไป ก่อนที่จะนำเข้าสู่พื้นที่บำบัดต่อไป โดยระบบนี้มีวัตถุประสงค์ คือ

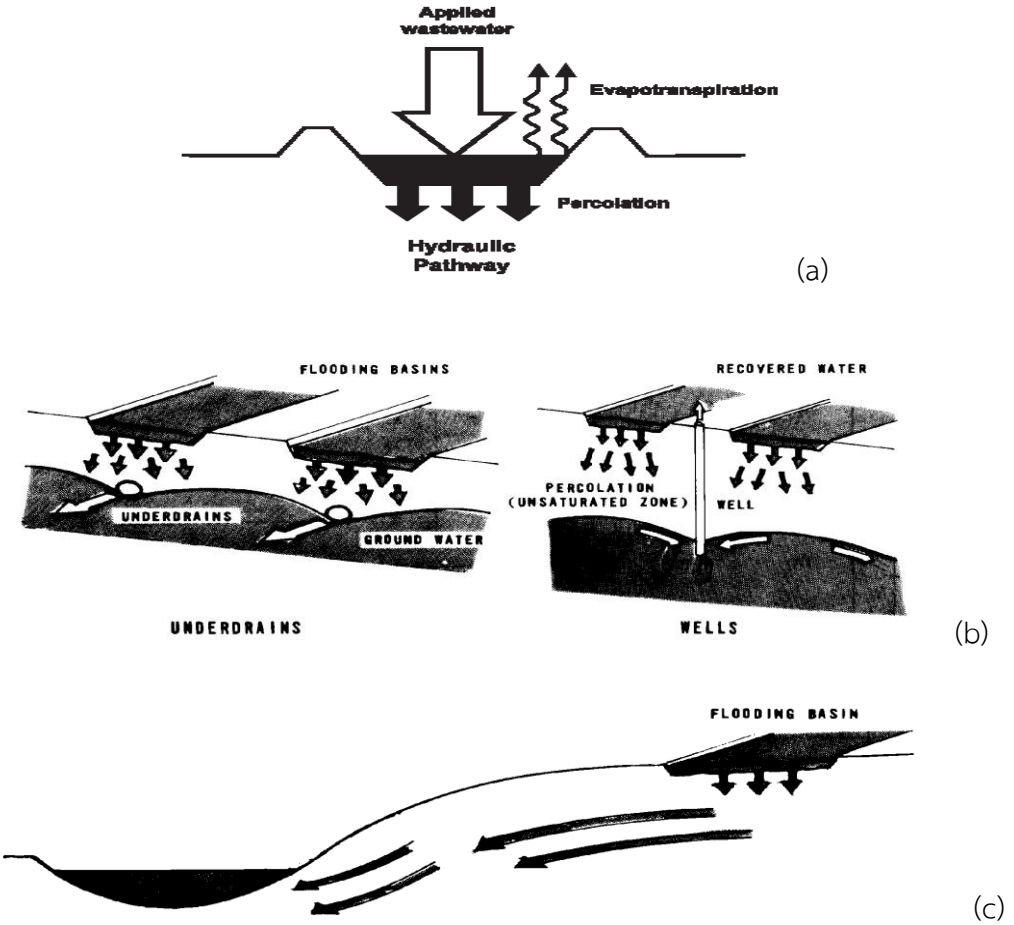
- ประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
- นำน้ำและสารอินทรีย์กลับมาใช้ประโยชน์ต่อพืช
- เปลี่ยนน้ำเสียให้กลายเป็นน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ (Mousavinezhad *et al*., 2015)



รูปที่ 2.13 Slow – Rate Systems
(a) hydraulic pathway (b) recovery pathways (c) subsurface pathway
ที่มา : U.S.EPA (1981)

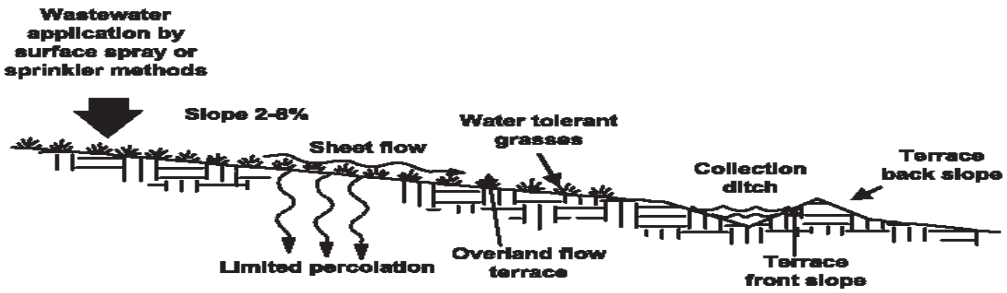
2) ระบบอัตราการไหลซึมเร็ว (Rapid infiltration systems) เป็นการนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วมาเก็บกักไว้ใต้พื้นที่เพาะปลูก เพื่อนำกลับมาใช้ในระยะเพาะปลูก วิธีนี้เป็นการปล่อยให้น้ำเสียที่ได้ถูกบำบัดขั้นต้นแล้ว เช่นการตกตะกอน มาลงในบ่อหรือร่องรองรับน้ำเสีย ซึ่งจะเกิดการระเหยออก และการซึมลงดิน วิธีนี้จึงจะปล่อยให้น้ำเสียไหลเข้าในอัตราที่สูงกว่าระบบอัตราการไหลช้า ดังนั้นปัจจัยที่เกี่ยวกับการระเหยออกจะไม่เป็นปัจจัยสำคัญ การปลูกพืชจึงไม่จำเป็นต้องทำ เมื่อน้ำเสียได้ไหลลงส่วนล่างของชั้นดินอาจใช้ท่อรองรับน้ำที่ผ่านชั้นดินแล้ว ซึ่งฝังอยู่ใต้ดินเพื่อระบายน้ำทิ้งออก หรือใช้บ่อที่ขุดลึกถึงชั้นน้ำใต้ดินเพื่อทำการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยระบบนี้มีวัตถุประสงค์ คือ

- การเติมน้ำใต้ดิน
- การบำบัดน้ำเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่
- กักเก็บไว้สำหรับการเกษตรในช่วงที่ขาดแคลนน้ำ (Mousavinezhad *et al*. 2015)



รูปที่ 2.14 Rapid Infiltration Systems
(a) hydraulic pathway (b) recovery pathway (c) natural drainage into surface waters
ที่มา : U.S. EPA. (1981).

3) ระบบน้ำไหลนอง (Overland - flow systems) วิธีนี้เป็นการปล่อยให้น้ำเสียที่ไหลออกจากท่อเจาะรู หรือหัวกระจายน้ำเสียผ่านพืชต่างๆ จนถึงรางรองรับน้ำทิ้งเพื่อการระบายน้ำทิ้งต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ขณะที่น้ำไหลผ่านพืชต่างๆ ลงมา จะมีการไหลซึมลงใต้ดินส่วนหนึ่ง การคายน้ำออกจากพืชและพื้นดินอีกส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะไหลลงรางรองรับน้ำทิ้ง ระบบนี้ต้องการน้ำเสียที่ไหลผ่านตะแกรงละเอียด และไม่ควรให้น้ำเสียที่จะเข้าระบบนี้มีพวกสาหร่ายมาก เพราะจะไปลดประสิทธิภาพของระบบนี้



รูปที่ 2.15 Overland-Flow Systems
ที่มา : U.S. EPA. (1981).

2.9.4 กลไกการบำบัดโดยดิน

ประสิทธิภาพการบำบัดโดยดินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินและกลไกในการบำบัด นั้นคือเมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นดินจะถูกกรองโดยดิน นำไปใช้โดยพืชเพื่อการเจริญเติบโต เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน และการกักเก็บไว้ในดิน ซึ่งสามารถแบ่งกลไกการบำบัดได้เป็น 3 กลไกคือ

1) กลไกทางกายภาพ (physical mechanisms) เกิดจากน้ำเสียไหลซึมผ่านช่องว่างในดิน ทำให้อนุภาคแขวนลอยในน้ำถูกกักกั้นไว้โดยดิน เรียกว่าการกรอง ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดจะขึ้นอยู่กับความลึกของดิน ขนาดของเม็ดดิน เนื้อดิน และความสามารถที่ดินยอมให้น้ำซึมผ่านไปได้ ถ้าดินให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย หมายถึงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้สูง และถ้าดินยอมให้น้ำซึมผ่านได้ยาก หมายถึงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ (ธนิต เฉลิมยานนท์, 2550) ดังแสดงในตารางที่ 2.11 และเมื่ออนุภาคแขวนลอยไหลผ่านดิน จะทำให้เกิดการอุดตันช่องว่างในดิน อัตราการไหลซึมจึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านดิน

ชนิดของดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, k (cm/s)	การซึมผ่าน
กรวด	>10-1	สูง
ทรายหยาบ	$10^{-1} - 10^{-3}$	ปานกลาง
ทรายละเอียด	$10^{-3} - 10^{-5}$	ต่ำ
โคลนดินตะกอน	$10^{-5} - 10^{-7}$	ต่ำมาก
ดินเหนียว	$<10^{-7}$	ทึบน้ำ

ที่มา : ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ (2556)

2) กลไกทางเคมี (chemical mechanisms)
ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญในการบำบัดโดยดิน คือการดูดซับ (adsorption) และการตกผลึกทางเคมี (chemical precipitation) ในการดูดซับโดยดินจะเกิดปรากฏการณ์ Cation exchange ซึ่งดินจะมีค่า Cation exchange capacity (CEC) ในช่วง 2 – 60 meq/100g จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ humus และดินเหนียว ทั่วไปดินจะมีความสามารถในการดูดซับประจุบวกในน้ำเสีย เช่น โลหะ
ความสัมพันธ์ระหว่างประจุบวกในน้ำเสีย เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม จะมีความสำคัญ เมื่ออัตราส่วนของโซเดียมต่อประจุบวกพวกแคลเซียมและแมกนีเซียม (SAR) มีค่าสูง คือจะทำให้โซเดียมไอออนเข้าไปแทนที่แคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนในดินเหนียว ดินเหนียวจึงมีแสดงความเป็นโซเดียมไอออนออกมา ส่งผลต่อการกระจายตัวของเม็ดดินและลดการซึมน้ำของดิน โดย Sodium Adsorption Ratio (SAR) ควรมีค่าไม่เกิน 8 – 10 สามารถคำนวณ SAR ได้ดังสมการ

$$SAR = \frac{Na}{\left[(Ca+Mg)/2\right]^{0.5}}$$

เมื่อ Na, Ca และ Mg เป็นความเข้มข้น หน่วย meq/L

นอกจากนี้ในการบำบัดน้ำเสียโดยดิน ควรจะมีการบำบัดเบื้องต้นก่อน เช่นการตกผลึกทางเคมี เพื่อลดสารพิษและสารเคมีในน้ำเสีย การปรับพีเอชและ SAR ให้เหมาะสมต่อการบำบัดโดยดิน

3) กลไกทางชีวภาพ (biological mechanism)
กลไกทางชีวภาพในดิน เช่นการย่อยสลายสารอินทรีย์และธาตุอาหารโดยพืชหรือจุลินทรีย์ กลไกนี้จะเกิดบริเวณผิวหน้าดินในช่วงความลึก 2 – 3 cm ในช่วงของรากพืชจะมีแบคทีเรียเกิดขึ้น 1- 3 thousand / g soil ซึ่งการไม่มีออกซิเจนในดินจะส่งผลต่อการเติบโตและการย่อยสลาย ออกซิเจนในดินจะขึ้นอยู่กับช่องว่าง นอกจากนี้กลไกทางชีวภาพจะเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันในดิน ที่แอมโมเนียและอินทรีย์ไนโตรเจนในดินจะเปลี่ยนแปลงเป็นไนเตรทภายใต้สภาวะมีอากาศ ส่วนไนเตรทสามารถเป็นไนโตรเจนแก๊สได้ในสภาวะไร้อากาศนั้นคือกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

2.9.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจนี ชูทอง (2555) บำบัดน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยดินในคอลัมน์ โดยรดน้ำด้วยอัตรา 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week ทำการรดทุกๆ 2 d และสัปดาห์ละครั้ง พบว่าที่อัตรา 1 cm/week ทำการรดทุก 2 d มีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีและฟอสฟอรัสสูงสุด

คือร้อยละ 97.7 $\pm$ 0.6 และ 99.1 $\pm$ 0.8 และคอลัมน์ที่รดด้วยอัตรา 0.25 cm/week มีประสิทธิภาพบำบัดทีเคเอ็นดีที่สุดคือร้อยละ 98.9 $\pm$ 0.9

จุฑารัตน์ หนูสุข (2546) บำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน รวมกับการปลูกต้นธูปฤาษี จำนวน 3 บ่อ พบว่า การระบายน้ำด้วยอัตรา 0.086 m^3/d ระยะเวลาเก็บกัก 15 d มีประสิทธิภาพกำจัดของแข็งแขวนลอย บีโอดี สี ซีโอดีได้สูงสุดคือร้อยละ 90.49, 74.11, 61.65 และ 59.06 ตามลำดับ แต่ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดยังไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง จึงควรลดอัตราการไหลเข้าระบบ หรือเพิ่มระยะเวลากักเก็บ เนื่องจากพบว่าจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น

ธิดารัตน์ บุญศรี (2543) ทำการบำบัดสีในน้ำชะขยะโดยใช้ดินเป็นสารดูดติด ทดลองด้วยดิน 3 ชนิดคือ ดินร่วน ดินเหนียวร่วน และทรายแป้งปนดินเหนียว พบว่าในการทดลองแบบแบทช์ ที่ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างดินกับน้ำชะขยะ 5 hr ไม่สามารถอธิบายกลไกการดูดติดผิวได้ หลังจากนั้นจึงหาไอโซเทอมการดูดติดผิวโดยดูจากค่าสี พบว่าดินทรายแป้งปนดินเหนียวจะมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด แต่น้ำสามารถซึมผ่านดินได้น้อย ในการทดลองแบบต่อเนื่องจึงทำการเติมทรายในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเพิ่มช่องว่างในดิน พบว่าน้ำสามารถซึมผ่านได้มากขึ้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ หลังจากเดินระบบ 26 d จะลดสี และสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 93 – 95 และมากกว่า 60 ตามลำดับ ด้วยกระบวนการดูดติดผิว การแลกเปลี่ยนประจุ และการกรองในดินเป็นหลัก

เภสัชรัตน์ กชกรจารุพงศ์ (2550) ใช้วิธีการบำบัดโดยดินกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ซึ่งทดลองกับแปลงหญ้ามาเลเซีย แปลงผักบุ้งจีน และแปลงควบคุม โดยมีการให้น้ำที่มีลักษณะสมบัติแตกต่างกัน พบว่าการบำบัดโดยดินสามารถกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งได้สูง และพืชยังสามารถใช้ไนโตรเจนในน้ำทิ้งได้มากกว่าปุ๋ยไนโตรเจนที่แนะนำอีกด้วย

พัชร สนั่นพัฒนพงศ์ (2555) บำบัดน้ำทิ้งโรงงานน้ำยางข้นโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน โดยรดน้ำด้วยอัตราการไหลช้า คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุดการทดลองคือ แปลงที่ทำการรดน้ำทุกวัน และแปลงที่ทำการรดน้ำสัปดาห์ละครั้ง และมีแปลงควบคุมอีก 2 แปลง คือเป็นแปลงที่ไม่รดน้ำ และแปลงที่รดด้วยน้ำฝน พบว่า แปลงที่รดน้ำสัปดาห์ละครั้งมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าแปลงที่รดน้ำทุกวัน โดยแปลงที่มีอัตราการรด 0.5 cm/week มีประสิทธิภาพบำบัด ซีโอดี ทีเคเอ็น และของแข็งแขวนลอยได้ดีที่สุดคือร้อยละ 81.7$\pm$12.7, 74.1$\pm$18.3 และ 80.0$\pm$15.9 ตามลำดับ

Balks *et al*. (1997) ใช้ดินร่วนปนตะกอนทรายบรรจุในคอลัมน์ ความลึก 15 cm ความหนาแน่น 0.67 $\pm$ 0.02 g/cm^3 มาบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเนื้อสัตว์เพื่อดูค่าการซึมผ่านดินที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าดินที่อุณหภูมิ 13°C มีค่าการซึมน้ำลดลงน้อยกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับคอลัมน์ควบคุมที่เติมน้ำประปา และเมื่อเดินระบบไป 41 d ค่าการซึมจะไม่มีความแตกต่าง ส่วนดินที่อุณหภูมิ 25°C จะมีการซึมลดลงกว่าร้อยละ 70 แต่จะมีอัตราการซึมเร็วกว่าที่ 13°C และที่ผิวหน้าของดินพบชั้นฟิล์มที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์จากแบคทีเรีย และในระยะเวลาหนึ่งจะพบจุลินทรีย์ แต่หลังจาก 44 d ที่ 25 $^{\circ}$C และ 155 d ที่ 13 $^{\circ}$C จุลินทรีย์เหล่านี้จะปรากฏไม่ชัดเจน

Cabrera *et al*. (1996) บำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกด้วยการบำบัดโดยดินเหนียว ในระยะเวลา 3 year พบว่าการบำบัดโดยดินมีประสิทธิภาพการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสียได้ อีกทั้งยังเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดินที่ใช้ในการบำบัด เช่นการเพิ่มของสารอินทรีย์ ไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ และฟอสฟอรัส รวมทั้งค่าการนำไฟฟ้าของดินและ Sodium adsorption ratio (SAR) ก็เพิ่มขึ้น ดังนั้นการบำบัดโดยดินจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้จริงในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันมะกอก

Christen *et al*. (2010) บำบัดน้ำเสียจากโรงงานทำไวน์ ด้วยการบำบัดโดยดินร่วนเหนียวปนทรายร่วมกับการปลูกพืช และระบายน้ำเสียด้วยอัตราการไหลช้า พบว่าดินมีประสิทธิภาพทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าพีเอชเป็นกลาง ค่าของแข็งแขวนลอย บีโอดี และธาตุอาหารที่เป็นพิษลดลง ทำให้ค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้ง และเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียมีปริมาณสูงจะส่งผลทำให้เกิดการอุดตันในช่องว่างของดิน ค่าการซึมน้ำจึงลดลง

Gilbert *et al*. (1976) บำบัดน้ำเสียจากระบบ activated sludge โดยชั้นดินที่ประกอบด้วยทรายละเอียด ทรายปนดินร่วน ทรายหยาบ กรวด และชั้นดินเหนียว เพื่อศึกษาการกำจัดไวรัสและแบคทีเรีย พบว่าในการเดินระบบเป็นระยะเวลา 2 month น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่ความลึก 9 m จะไม่พบไวรัสหรือ *Salmonella* sp. และตรวจพบแบคทีเรียลดลงกว่าร้อยละ 99.9

Smith (1976) ทำการบำบัดน้ำเสียโรงงานมันฝรั่ง โดยใช้ระบบอัตราการไหลช้า ภาระบรรทุกซีโอดี 45 – 310 kg/ha-d ในระยะเวลา 2 year พบว่าหลังจากน้ำเสียซึมผ่านชั้นดินลึก 1.5 m มีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 95 - 98 เช่นเดียวกับไนโตรเจนที่มีการลดลง

Taebi and Droste (2008) ใช้ดินร่วนปนตะกอนทราย ประกอบด้วย ดินเหนียว ร้อยละ 26 ดินตะกอนร้อยละ 63.3 และทรายร้อยละ 5.7 ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น, น้ำทิ้งจากระบบ activated sludge และน้ำทิ้งจากบ่อโรงงานสิ่งทอ โดยใช้ระบบน้ำไหลนอง มีอัตราการซึมที่ 0.15, 0.25 และ 0.35 m^3/m^2-hr พบว่าที่ 0.15 m^3/m^2-hr มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และความขุ่นดีที่สุดคือร้อยละ 74.5, 54.8, 66.2, 39.4, 35.8 และ 67.7 ตามลำดับ สำหรับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น มีประสิทธิภาพร้อยละ 52.9, 52.9, 66.5, 44.4, 39.8 และ 50.1 ตามลำดับ สำหรับน้ำทิ้งระบบ activated sludge และมีประสิทธิภาพร้อยละ 65.7, 58.7, 70.3, 41.7, 41.3 และ 54.9 ตามลำดับสำหรับน้ำทิ้งโรงงานสิ่งทอ

Tzanakakis *et al*. (2007) บำบัดน้ำเสียจากหอพักที่ผ่านถังตกตะกอน หลังจากนั้นนำมาบำบัดโดยดินร่วนปนเหนียว เป็นระยะทาง 10 km และพื้นที่จะมีการปลูกพืช คือ Acacia cyanophylla, Eucalyptus camandulensis, Populus nigra และ Arundo donax ทำการรดน้ำเสียด้วยระบบอัตราการไหลช้า พบว่ามีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี ไนโตรเจนได้มากกว่าร้อยละ 80 – 90 และสามารถกำจัด total coliform และ Fecal coliform bacteria ได้มากกว่าร้อยละ 99.99

Yang *et al*. (2010) บำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว มาเข้าสู่การบำบัดโดยดินในคอลัมน์ โดยทำการเดินระบบเป็นเวลา 8 week ใช้อัตราภาระบรรทุก 17 mm/d เป็นระบบอัตราการไหลช้า พบว่าสามารถบำบัดบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้มากกว่าร้อยละ 90

2.10 กระบวนการเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Synthetic membrane process)

เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์หรือเมมเบรนในการแยกสาร โดยใช้แรงขับดันให้ของผสมหรือสารละลายไหลผ่านเมมเบรน ซึ่งสารที่สามารถถ่ายเทผ่านเมมเบรนได้ จะเป็นส่วนของเพอมิเอท (Permeate) และส่วนที่ถูกกักกันไว้ ไม่สามารถไหลผ่านเมมเบรนได้ จะเป็นส่วนของรีเทนเทต (Retentate)

รูปที่ 2.16 หลักการของกระบวนการเยื่อแผ่น

2.10.1 ลักษณะการกรอง

1) การกรองแบบ Dead – end เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคเรียกว่า เค้ก (Cake) ซึ่งจะต้านทานการไหล ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว การกรองแบบ Dead – end จึงควรใช้กับสารละลายที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ความเข้มข้นต่ำ
2) การกรองแบบ Cross flow เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางไหลขนานกับเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมิเอท ซึ่งจะช่วยลดการเกิด Concentration polarization (CP) ทำให้มีการสะสมของเค้กเพียงแค่บางๆ ค่าฟลักซ์จึงไม่ลดลงรวดเร็วเหมือนการกรองแบบ Dead – end จึงเหมาะที่จะใช้กับสารที่มีความเข้มข้นสูง

2.10.2 โมดูลเมมเบรน

1) โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame module) เป็นเมมเบรนสองแผ่นประกบกันให้สารละลายไหลผ่านระหว่างทั้งสองแผ่น โดยในแต่ละโมดูลประกอบด้วยหลายคู่วางซ้อนกันหรือวางเรียงกันเป็นชั้นๆ
2) โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral wound) เป็นเมมเบรนเรียบม้วนรอบแกน โดยจะมีแผ่นกั้นลักษณะค่อนข้างซับซ้อน
3) โมดูลแบบท่อ (Tubular module) เป็นเมมเบรนแบบท่อขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 – 15 mm ซึ่งจะมีหลายๆท่อเล็กอยู่ในตัวบรรจุ (housing) โดยสารละลายจะไหลเข้าด้วนในท่อและเพอมิเอทจะไหลผ่านเมมเบรนไปเก็บรวมกันนอกตัวบรรจุ
4) โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module) เป็นเมมเบรนที่ผลิตเป็นเส้นใยมีรูกลวงเส้นผ่านศูนย์กลางผ่านใน 0.1 – 0.5 mm และความหนาแน่นของเส้นใย 1 – 2 mm ปลายของเส้นใยทั้งสองด้านจะฝังอยู่ในชิ้นฐานที่ผลิตจากเรซิน ซิลิโคนรับเบอร์ เป็นต้น

2.10.3 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน

1) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นกระบวนการแยกที่เมมเบรนมีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คือ 0.1 – 1 μm ใช้แยกอนุภาคขนาดใหญ่ เช่น สารแขวนลอย โดยจะใช้แรงขับดันในการแยกช่วง 1 – 5 bar หรือ 100 – 500 kPa ซึ่งใช้เมมเบรนชนิดนี้ในงานวิจัย มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.12 การกรองของไมโครฟิลเตรชันแบบ Dead – end จะเกิดการต้านทานการไหลและเค้กบนผิวเมมเบรน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าฟลักซ์ (Darcy's Law)

$$J_V = \left(\frac{1}{A}\right) \cdot \left(\frac{dV}{dt}\right)$$

เมื่อ J_V = ฟลักซ์ของเพอมิเอท ($m^3/m^2.h$)

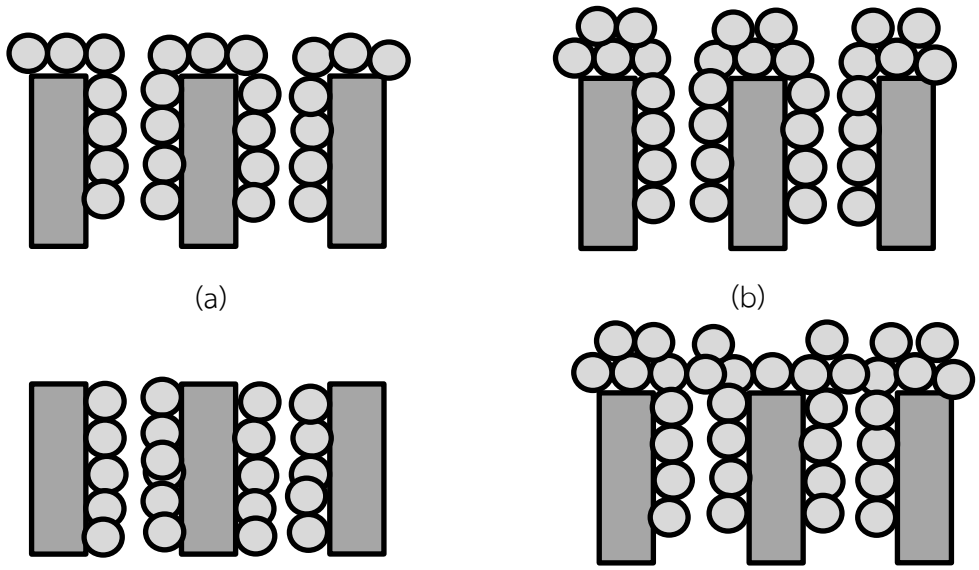
A = พื้นที่เมมเบรน (m^2)

V = ปริมาตรของเพอมิเอท (m^3)

t = เวลา (h)

ส่วนการกรองแบบไหลขวาง ด้วยแบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่ (Constant pressure filtration model) จะแบ่งการอุดตันเป็นแบบต่างๆดังนี้

- Complete Blocking Filtration Model (CBM) มีสมมติฐานว่าอนุภาคของสารละลายที่ป้อนเข้าจะไปอุดตันรูพรุนของไมโครฟิลเตรชันโดยมีลักษณะไม่ซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (a)
- Intermediate Blocking Filtration Model (IBM) มีลักษณะคล้ายคลึงกับ CBM แต่อนุภาคที่อุดตันจะมีลักษณะซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (b)
- Standard Blocking Filtration Model (SBM) เป็นการกรองสารละลายที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน ทำให้อนุภาคสามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ ซึ่งจะมีบางส่วนที่หลุดออกและบางส่วนที่ถูกดูดซับผ่านในรูพรุน ทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเมมเบรน ไม่มีการสะสมบนผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (c)
- Cake Filtration Model (CFM) เป็นการกรองสารละลายที่มีอนุภาคขนาดแตกต่างกัน โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจะถูกสะสมเป็นเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสะสมอยู่ภายในรูพรุน เกิดเป็นเค้กบนผิวหน้าเมมเบรนจนสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (d)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองการอุดตัน (a) CBM (b) IBM (c) SBM (d) CFM
ที่มา : ดัดแปลงจาก Velaa *et al*. (2008) และ กัลยา ศรีสุวรรณ (2542)

แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance – in – series model)

– ความต้านทานของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (membrane resistance; R_m)

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w}$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (m^{-1})
ΔP = ความดันที่ให้ระบบ (Pa)
μ_w = ความหนืดของน้ำสะอาด (Pa.s) มีค่า 8.9793×10^{-4} Pa.s
J_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดก่อนการใช้งาน (m^3/m^2s)

– ความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดจากฟาวลิง

$$R_m + R_f = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w'}$$

เมื่อ $R_m + R_f$ = ความต้านทานของเมมเบรนรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดจากฟาวลิง
J_w' = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเมมเบรนและล้างด้วยน้ำสะอาดแล้ว (m^3/m^2s)

– ความต้านทานเนื่องจากการเกิดจากฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f)

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m$$

– ความต้านทานจากการเกิดจากโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance, R_p)

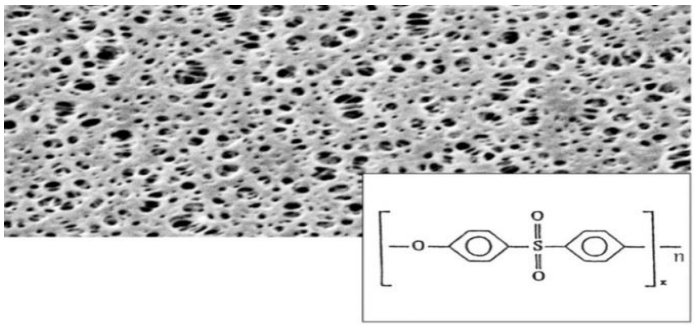
$$R_p = R_t - (R_m + R_f) = \frac{\Delta P}{\mu J} - (R_m + R_f)$$

เมื่อ R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหล (m^{-1})
ΔP = ความดันที่ให้ระบบ (Pa)
μ = ความหนืดของน้ำตัวอย่างที่ผ่านเมมเบรน (Pa.s)
J = ฟลักซ์ของน้ำตัวอย่างที่ผ่านเมมเบรน (m^3/m^2s)
(กัลยา ศรีสุวรรณ, 2542)

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในงานวิจัย

Diameter	47 mm
Material	organic membrane Polyethersulfone (PES) Membrane
Reaction to water	Hydrophilic
Type	Membrane filter
Pore size	0.45 µm

ที่มา: satorius (2015)



รูปที่ 2.18 พื้นผิวและสูตรโครงสร้างของไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในงานวิจัย

2) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการแยกที่ใช้เมมเบรนรูพรุนขนาดเล็ก คือ 2 – 20 nm ใช้แรงขับดันในการแยก 1 – 8 bar หรือ 100 – 800 kPa โดยค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จาก

$$J_V = \frac{(\Delta P - \Delta \P)}{\mu_V R_t}$$

เมื่อ J_V = ฟลักซ์ของเพอมิเอท (m3/m2.s)

ΔP = ผลต่างของความดันที่ให้กับสารละลาย (Pa)

$\Delta \P$ = ผลต่างของความดันออสโมติกของสารละลาย (Pa)

μ_V = ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)

R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน (m^{-1})

ค่าการกักกันปรากฏ

$$R = \left(1 - \frac{C_P}{C_R}\right) \times 100$$

เมื่อ C_P = ความเข้มข้นของเพอมิเอท

C_R = ความเข้มข้นของรีเทนเทต

แต่เนื่องจากการเกิด CP ทำให้ผิวหน้าเมมเบรน C_w มีความเข้มข้นสูงกว่า C_R ค่าการกักกันจริงจึงมีค่ามากกว่าการกักกันปรากฏ หาได้จาก

$$R_{int} = \left(1 - \frac{C_P}{C_w}\right) \times 100$$

ในอัลตราฟิลเตรชัน Concentration Polarization (CP) เกิดจากสารละลายที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ จึงเกิดการสะสมบนผิวหน้าทำให้มีความเข้มข้นสูง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดฟาวลิงและเจล CP ซึ่งมีความแตกต่างกันคือ เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งการเกิด CP จะเกิดจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรน เจลจะเกิดถัดลงมาจาก CP เกิดใกล้ชิดผิวหน้าของเมมเบรนมากกว่า CP ส่วนฟาวลิงจะเกิดจากการกักเก็บและดูดซับภายในรูพรุนและบนผิวเมมเบรน ซึ่งไม่สามารถใช้อัตราการไหล ความดันหรือการล้างน้ำเพื่อกำจัดชั้นฟาวลิงได้

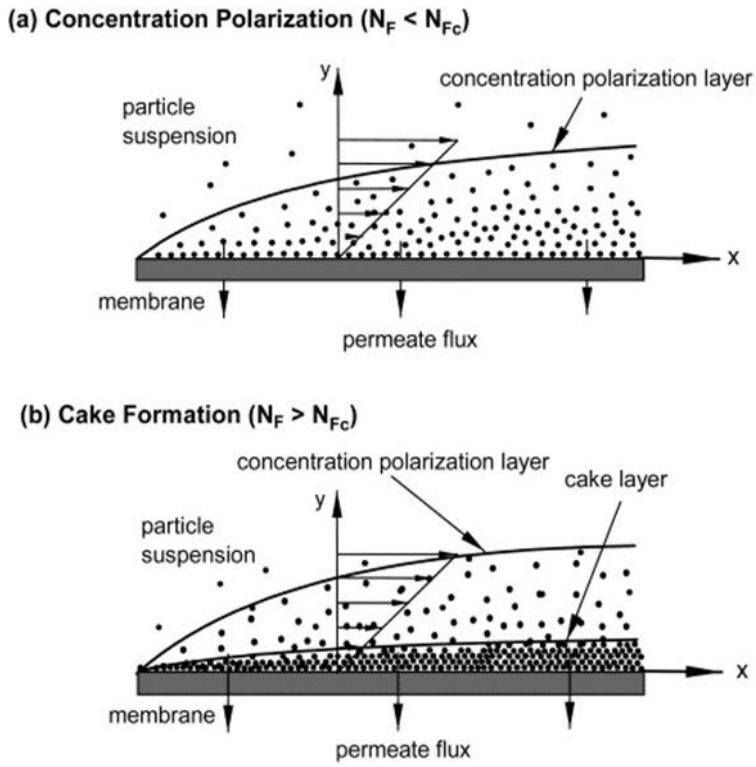
3) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) ใช้สำหรับแยกสารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เกลืออนินทรีย์ สารอินทรีย์ แรงขับดันที่ใช้ 1 – 2 MPa หรือ 10 – 20 bar
4) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) เป็นกระบวนการแยกสารละลายโดยใช้ผลต่างของความดันระหว่างเมมเบรนเป็นแรงขับดัน มีความสามารถในการกักกันโมเลกุลขนาดเล็ก แต่จะยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้ เป็นเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน มีโครงสร้างหนาแน่น ความดันที่ใช้ป้อนสารละลายคือ 1- 10 MPa หรือ 10 – 100 bar

2.10.4 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรน

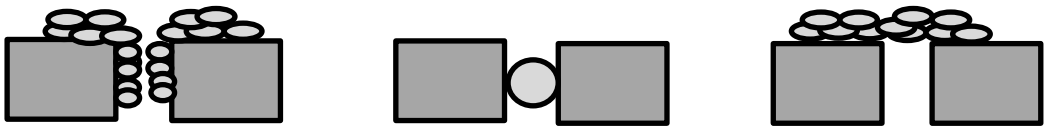
1) สามารถแยกสารละลายตามขนาดโมเลกุล ประจุ หรือรูปร่างได้
2) กระบวนการเมมเบรนส่วนใหญ่ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ
3) ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งรีเทนเทตและเพอมิเอท
4) สามารถขยายให้ใช้กับระดับอุตสาหกรรมได้
5) เดินระบบแบบกะ (batch) หรือต่อเนื่อง (continuous) ได้
6) มีขนาดกะทัดรัด ไม่ต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง

2.10.5 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรน

1) Concentration polarization (CP) อธิบายได้ด้วยฟาวลิงแบบผันกลับได้ เกิดจากการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ บริเวณใกล้หรือบนผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้มีความเข้มข้นบิรเวณผิวเมมเบรนสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป (Bulk) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (a) จึงเกิดการแพร่กลับไปยัง bulk เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น แต่ความเข้มข้นบริเวณผิวเมมเบรนถึงขีดจำกัดการแพร่กลับ จะทำให้เกิดเป็นชั้นเค้กครอบคลุมผิวเมมเบรน ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (b) ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลง และนำไปสู่การเกิดฟาวลิง (Fouling)
2) ฟาวลิง (Fouling) จากการเกิด CP ที่นำไปสู่การเกิดฟาวลิงนั้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นบริเวณผิวเมมเบรนถึงขีดจำกัดการแพร่กลับ จะเกิดเป็นชั้นเค้กครอบคลุมผิวเมมเบรนซึ่งใกล้ชิดกับผิวเมมเบรน ทำให้มีการสะสมและดูดซับอนุภาคเหล่านั้นบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งไม่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำ จำเป็นจะต้องใช้สารเคมีในการล้าง การเกิดฟาวลิงจะทำให้สมรรถนะของเมมเบรนลดลง นั้นคือค่าฟลักซ์และการกักกันมีค่าลดลง ซึ่งสามารถแบ่งฟาวลิงจากสิ่งที่อุดตัน (foulant) ได้เป็น 4 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.13
3) ความคงตัวของเมมเบรน เนื่องจากเมมเบรนส่วนใหญ่ผลิตจากโพลิเมอร์จึงมีความคงตัวจำกัด ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดความคงตัวจำกัดของเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์มีทั้งพีเอช อุณหภูมิ ตัวทำละลายสารอินทรีย์ ส่วนเมมเบรนที่ผลิตจากเซรามิกจะคงตัวต่ออุณหภูมิและสารเคมีดี แต่ประสิทธิภาพในการแยกต่ำกว่าเมมเบรนที่เป็นโพลิเมอร์



รูปที่ 2.19 Concentration polarization (CP) และ cake layer
ที่มา: ดัดแปลงจาก Chen *et al*. (2004)



(a) (b) (c)

รูปที่ 2.20 รูปแบบการเกิดการอุดตัน
(a) Pore Narrowing (b) Pore Plugging (c) Gel / Cake Formation
ที่มา: ดัดแปลงจาก Bourgeous *et al*. (1999)

ตารางที่ 2.13 ประเภทของการอุดตัน

ประเภทของฟาวลิง	สิ่งที่ทำให้เกิดการอุดตัน	กลไกการเกิดการอุดตัน
Inorganic / Scaling	Metal oxides Inorganic colloids Calcium sulfate, Carbonate and Fluoride Barium sulfate Silica	Pore Narrowing Gel / Cake Formation
Colloid / Particlulate fouling	Suspended solid Colloids Biologically Inert Particles	Pore Narrowing Pore Plugging
Microbial / Biological fouling	Bacteria Microorganisms Concentration Polarization	Pore Narrowing Pore Plugging Gel / Cake Formation
Organic fouling	NOM	Pore Narrowing Gel / Cake Formation

ที่มา : Holman and Ohlinger (2007)

2.10.6 การลดการเกิดฟาวลิง

1) การไหลของสารป้อนเข้า ควรป้อนสารละลายในลักษณะไหลขวางที่ความเร็วสูง จะช่วยลดการเกิด CP และฟาวลิง
2) การบำบัดสารป้อนเข้า
3) คุณสมบัติของเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุไม่ชอบน้ำจะเกิดฟาวลิงได้ง่าย ฟลักซ์ต่ำ แต่ทนความร้อนและสารเคมีมากกว่าโพลิเมอร์ที่ชอบน้ำ จึงควรปรับสภาพผิวของเมมเบรนโพลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำด้วยสารลดแรงตึงผิว (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

ตารางที่ 2.14 ข้อดีและข้อจำกัดของเมมเบรน

ข้อดี	ข้อจำกัด
– น้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านเมมเบรนสามารถนำกลับมาใช้เป็นน้ำดื่มหรือใช้ในอุตสาหกรรมใหม่ได้ – มีประสิทธิภาพกักกันของแข็งแขวนลอยได้สูง – ต้องการพื้นที่ในการบำบัดน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ระบบบ่อ	– เกิดฟาวลิงบนเมมเบรน – ควรมีการบำบัดขั้นต้นก่อนเพื่อลดปัญหาฟาวลิง – จะต้องเปลี่ยนเมมเบรนหรือทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Wu *et al*. (2010)

2.10.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัลยา ศรีสุวรรณ (2542) ทำการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 0.1, 0.22 และ 0.45 μm ด้วยความดัน 100 kPa พบว่า มีค่าฟลักซ์ 82, 137 และ 201 L/m^2-hr ตามลำดับ ทำให้เกิดการอุดตันแบบ Standard Blocking Filtration Model (SBM) เนื่องจากอนุภาคในน้ำเสียมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน แต่เมื่อทำการกรองไปสักระยะจะเกิด cake บนผิวหน้าเมมเบรน และเมื่อนำน้ำเสียมาบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อนเข้าเมมเบรน พบว่า การโคแอกกูเลชันที่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ จะเกิดการอุดตันแบบ SBM เช่นกัน แต่ไม่มีการสะสม cake บนผิวเมมเบรน ส่วนการโคแอกกูเลชันที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงจะเกิดการอุดตันแบบ Cake Filtration Model (CFM) อีกทั้งทดลองทำการกรองด้วยเมมเบรน UF พบว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าการใช้ MF แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีและ ซีโอดีสูงกว่า โดยฟาวลิงที่เกิดขึ้นเป็นแบบ SBM เช่นกัน

สุปรีดา วัชรจิรโสภณ และ นันทนา ดาโอะ (2554) การลดสารอินทรีย์และสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งบำบัดขั้นต้นด้วยการโคแอกกูเลชันด้วยโพลูมินัมคลอไรด์และการใช้โพลูมินัมคลอไรด์ร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดแอนไอออนและแคทไอออน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดที่ไม่แตกต่างกัน คือ สามารถลดความขุ่น สี และซีโอดีได้ 58%, 84%, 86% ตามลำดับ หลังจากนั้นน้ำจะผ่านกระดาษกรองขนาด 8μm ซึ่งสามารถกำจัดความขุ่น สี และซีโอดี ได้ 96%, 21%, 89% ตามลำดับ และเข้าสู่ UF ชนิดเซลลูโลสไนเตรทจะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น สี และ ซีโอดี เป็น 98%, 79%, 93% ตามลำดับ

Ahmad *et al*. (2003) การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคโนโลยีเมมเบรน ซึ่งมีการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมีสารส้ม 2 ถัง แล้วต่อด้วยกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน ก่อนเข้าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน และรีเวิร์สออสโมซิส พบว่า เมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นเข้าสู่อัลตราฟิลเตรชัน และรีเวิร์สออสโมซิส จะมีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น ซีโอดี และบีโอดีได้ร้อยละ 100, 98.8 , 99.4 ตามลำดับ ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดนี้มีคุณภาพที่ดี สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในบอยเลอร์ เพื่อใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มได้ ส่วนฟลักซ์ของอลัตราฟิลเตรชัน และรีเวิร์สออสโมซิส ก่อนบำบัดมีค่า 930.25และ 106.53 L/m^2h ตามลำดับ เมื่อผ่านการใช้งานและทำความสะอาดมีค่าลดลงเหลือ 883.61และ 105.02 L/m^2h ตามลำดับ

Ahmad *et al*. (2006) ทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มรวมกับโพลิเมอร์ ก่อนเข้าเมมเบรน UF ที่มี MWCO 200000 ใช้ความดัน -2 bar และ RO ใช้ความดันที่ – 45 bar พบว่าเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดผ่านเมมเบรนUF จะมีค่าฟลักซ์ลดลงร้อยละ 50 เมื่อทำการกรอง 6 hr. ขึ้นไป หลังจากนั้นจึงมาผ่าน RO พบว่า มีค่าฟลักซ์ลดลงร้อยละ 50 เมื่อทำการกรอง 23 hr. ขึ้นไป โดยเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด จะเกิดกลไกการอุดตันแบบ cake formation บนผิวเมมเบรนและฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 80 – 90 หลังจากล้างเมมเบรนด้วยสารเคมี

Idris *et al.* (2010) ทำการบำบัดทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้ ferric chloride และ polyacrylamide ก่อนนำเข้าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่มี MWCO 1 kDa และ 5 kDa พบว่าที่ TMP 1.5 bar จะเกิดฟาวลิงบนผิวเมมเบรน แบบ cake – layer ส่วนค่าฟลักซ์ของ MWCO 5 kDa จะมีค่าสูงกว่า MWCO 1 kDa

Shah and Singh (2004) ทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการหมุนเวี่ยงก่อนเข้าสู่เมมเบรน hollow fiber ผลิตจาก polyethersulfone (PES) ขนาด MWCO 30K พบว่าการบำบัดขั้นต้นด้วยการหมุนเหวี่ยงสามารถกำจัด ซีโอดี ความขุ่น สี และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 60 – 80 และเมื่อผ่านเมมเบรนจะมีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี สี ของแข็งแขวนลอย และความขุ่นได้ร้อยละ 89.9, 92.9, 99.4 และ 97.9 ตามลำดับ

Sulaiman and Ling (2004) บำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มบ่อสุดท้ายมากรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันแบบ hollow fiber ขนาด MWCO 30K และ 100 K พบว่าที่ MWCO 30K จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็นได้ดีกว่าที่ 100K คือร้อยละ 97.66, 98 และ53.85 ตามลำดับ แต่จะมีค่าฟลักซ์ที่ต่ำกว่า 100K

Wu *et al*. (2007) ทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการกรองหิน ทราย และกระดาษกรอง 8 μm ก่อนเข้าเมมเบรน UF ที่มี MWCO 20,000 ผลิตจาก polysulfone พบว่าเมื่อนำน้ำผ่านเมมเบรนที่ความดัน 0.8 MPa จะเกิดฟาวลิงขึ้นมากกว่าร้อยละ 85.8 เป็นการอุดตันแบบ pore plugging ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลด ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำ และ ซีโอดีได้มากว่าร้อยละ 97.7 , 88.5, 6.5 และ 57 ตามลำดับ อีกทั้งสามารถแยกโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตได้อีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1) สารส้ม (Aluminium sulfate ;Alum)
2) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly aluminium chloride ;PACl)
3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
5) สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ซีโอดี
6) สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ความเป็นด่าง

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1) เครื่องชั่งละเอียดยี่ห้อ Pioneer
2) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SCALTEC
3) เครื่องจาร์เทสต์ (Jar test)
4) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
5) เครื่องมือวิเคราะห์ซีโอดี ยี่ห้อ HACH
6) เครื่องวัดความขุ่น HACH 2100N
7) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า YSI 3200
8) ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert
9) ตู้อบ ยี่ห้อ Wiseven
10) GENESYS 10S UV-Vis spectrophotometer
11) HACH DR 6000 UV-Vis spectrophotometer
12) เครื่องวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอน
13) Spectrofluorometer ยี่ห้อ JASCO FP-6200
14) Fourier transform infrared spectrometer, Vertex 70, Bruker, Germany
15) Zeta potential analyzer, Model ZetaPALS, Brookhaven, USA
16) Scanning Electron Microscope รุ่น Quanta 400
17) เครื่องปั๊มดูดสุญญากาศ
18) เครื่องกวน YELLOW LINE OST 20 digital
19) โถดูดความชื้น
20) ชุดการทดลองเมมเบรน
21) ชุดการทดลองการบำบัดโดยดิน

22) แผ่นกรองใยแก้ว Whatman GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มม.
23) แผ่นกรองใยแก้ว Whatman GF/F ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มม.
24) แผ่นกรองใยแก้ว Whatman GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม
25) เมมเบรน Polyethersulfone 0.45 µm ยี่ห้อ Sartorius Stedim
26) เมมเบรน Nanofiltration ยี่ห้อ LENNTECH
27) ถังแก๊สไนโตรเจน
28) ตะแกรงสำหรับร่อน HUMBOLDT
29) เครื่องเขย่า Incubator Shaker, Gallenkamp
30) อ่างระเหย
31) เครื่องชั่งอย่างหยาบ รุ่น SB 32000 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
32) เครื่องคัดขนาดทราย (Test Sieve Shaker) รุ่น Octagan 300
33) แกลลอนขนาดความจุ 30 ลิตร
34) ขวดเก็บน้ำตัวอย่าง

3.2 วิธีการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างน้ำและดินภายในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง ซึ่งมีกำลังการผลิตประมาณ 14,000 FFB/month ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันปาล์มดิบและเมล็ดในปาล์ม เกิดเป็นน้ำเสียประมาณ 400 m^3/d โดยขั้นตอนการวิจัยประกอบไปด้วย

3.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียและน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

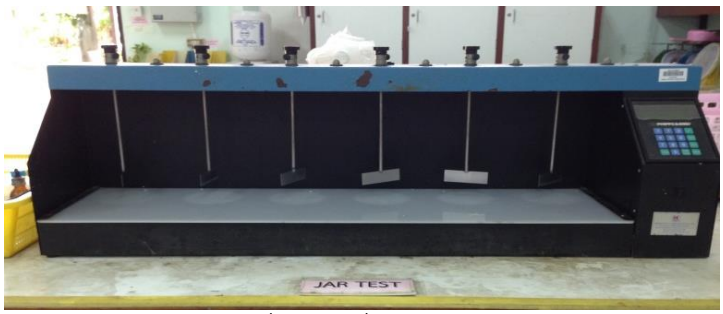
เก็บตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ทำการเก็บตัวอย่างแบบจ้วง โดยน้ำเสียทำการเก็บในบ่อแรก ส่วนน้ำทิ้งเก็บ ณ ตำแหน่งบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดแบบบ่อ (บ่อที่ 16) ซึ่งเป็นบ่อที่ปล่อยน้ำรดสวนปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.1พร้อมทั้งนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความขุ่น พีเอช ของแข็งแขวนลอย ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีละลายน้ำ ทีโอซี ดีโอซี ความเป็นด่าง UV254 สี SUVA การกระจายตัวของอนุภาค FTIR และ FEEM

รูปที่ 3.1 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด (บ่อสุดท้าย) ที่ปล่อยรดสวนปาล์ม

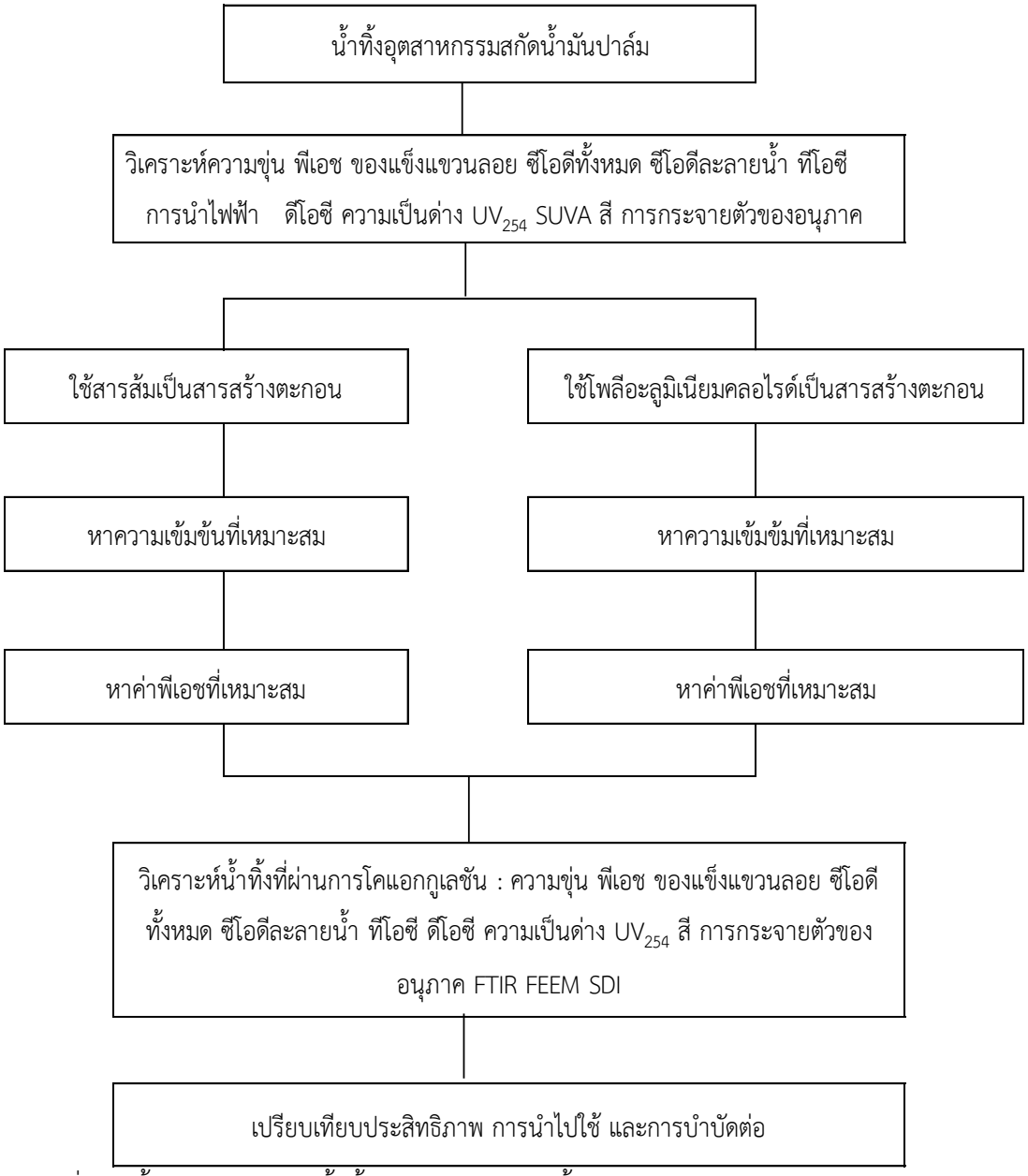
3.2.2 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

1) หาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน
   - ตวงน้ำทิ้งใส่บีกเกอร์ พร้อมกับเติมสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้นต่างๆ สารสร้างตะกอนที่ใช้ คือสารส้ม (Aluminium sulfate, Alum) และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly aluminium chloride, PACl)
   - เดินระบบเครื่องจาร์เทสต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ด้วยอัตราการกวนเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 1 min กวนช้า 30 rpm เป็นเวลา 30 min
   - เมื่อเริ่มระบบทำการปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะควบคุมพีเอชที่ 5.5 เมื่อใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน และควบคุมพีเอชที่ 7 เมื่อใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน และทิ้งให้ตกตะกอน 1 hr.
   - หลังจากหยุดระบบและทิ้งให้ตกตะกอน ทำการเก็บน้ำใสบริเวณตำแหน่งกลางบีกเกอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน โดยวิเคราะห์จากของแข็งแขวนลอย และซีโอดี
2) หาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของสารสร้างตะกอน
   - ตวงน้ำทิ้งใส่บีกเกอร์ พร้อมกับเติมสารสร้างตะกอน ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 2.1
   - เดินระบบเครื่องจาร์เทสต์ ด้วยอัตราการกวนเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 1 min กวนช้า 30 rpm เป็นเวลา 30 min
   - เมื่อเริ่มระบบทำการควบคุมพีเอชในช่วงต่างๆ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และทิ้งให้ตกตะกอน 1 hr.
   - หลังจากหยุดระบบและทิ้งให้ตกตะกอน ทำการเก็บน้ำใสบริเวณตำแหน่งกลางบีกเกอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน โดยวิเคราะห์จากของแข็งแขวนลอย และซีโอดี
3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันในสภาวะที่เหมาะสม

   วิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้งหลังผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในสภาวะที่เหมาะสม โดยวิเคราะห์ความขุ่น พีเอช ของแข็งแขวนลอย ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีละลายน้ำ ทีโอซี ความเป็นด่าง UV_{254} สี SUVA ขนาดอนุภาคเฉลี่ย FTIR FEEM SDI เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและการนำไปประโยชน์หรือนำไปบำบัดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องจาร์เทสต์



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

3.2.3 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดินในคอลัมน์

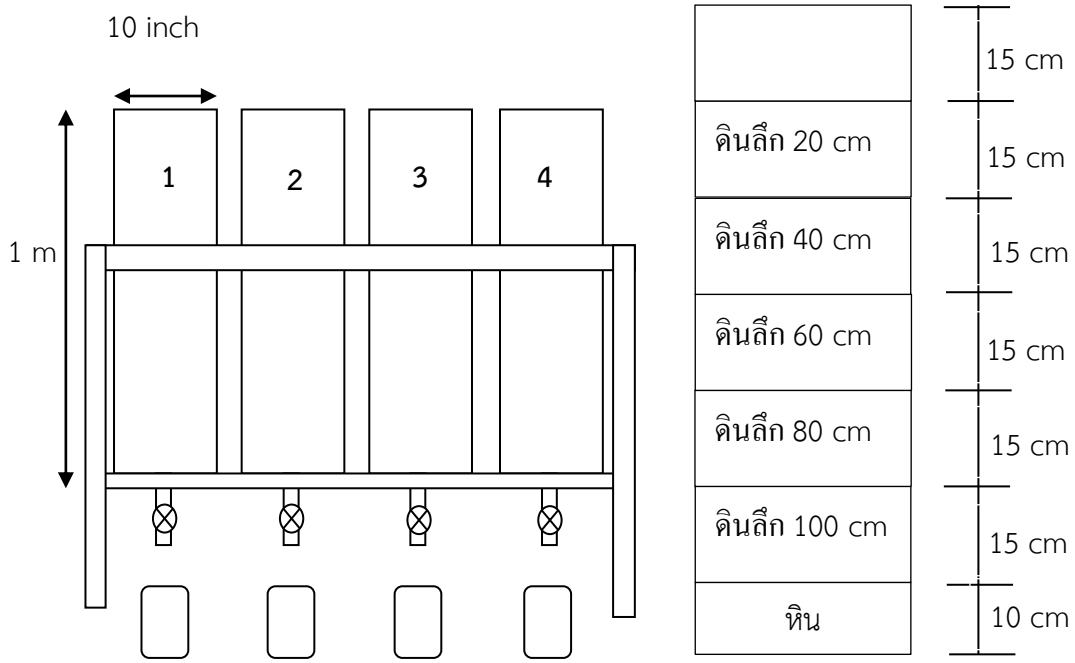
1) หาคุณสมบัติของดินในสวนปาล์ม

เจาะเก็บตัวอย่างดินในสวนปาล์ม บริเวณที่มีการปล่อยน้ำทิ้ง โดยทำการเจาะเก็บแบบ disturbed sample ทุกๆ ความลึก 20 cm ตลอดชั้นความลึก 100 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และนำดินที่ทำการเจาะเก็บมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ คือ ประเภทของดิน ความหนาแน่น ความชื้น ความถ่วงจำเพาะ องค์ประกอบของดิน

รูปที่ 3.4 การเจาะเก็บดินแบบ disturbed sample

2) การบำบัดโดยดินภายในคอลัมน์

- บรรจุดินลงในคอลัมน์ทรงกระบอกทำจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 inches สูง 1 m จำนวน 4 คอลัมน์ โดยบรรจุให้มีความสูง 75 cm ประกอบไปด้วยหิน 10 cm ดินที่เก็บมาแต่ละชั้นความลึกให้มีความสูงชั้นละ 15 cm ความหนาแน่นประมาณ 2 g/cm^3 ดังแสดงในรูปที่ 3.5
- เติมน้ำในคอลัมน์ที่ 1 และ 2 ด้วยอัตรา 1 cm/week (72 mL/d) และในคอลัมน์ที่ 3 และ 4 ด้วยอัตรา 3 cm/week (217 mL/d) ทำการรดทุกๆวัน โดยให้คอลัมน์ที่ 1 และ 3 เป็นคอลัมน์ควบคุมคือเติมน้ำกลั่น ส่วนคอลัมน์ 2 และ 4 เติมด้วยน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ดังแสดงในตารางที่ 3.1
- เก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินในทุกสัปดาห์ ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ คือ ปริมาณน้ำออก ค่าพีเอช การนำไฟฟ้า ความขุ่น และซีโอดี และวิเคราะห์น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินรวมตลอดระยะเวลา 14 สัปดาห์ โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ UV_{254} สี ซีโอดีละลายน้ำ ทีโอซี ดีโอซี SUVA ขนาดอนุภาคเฉลี่ย FTIR และ FEEM



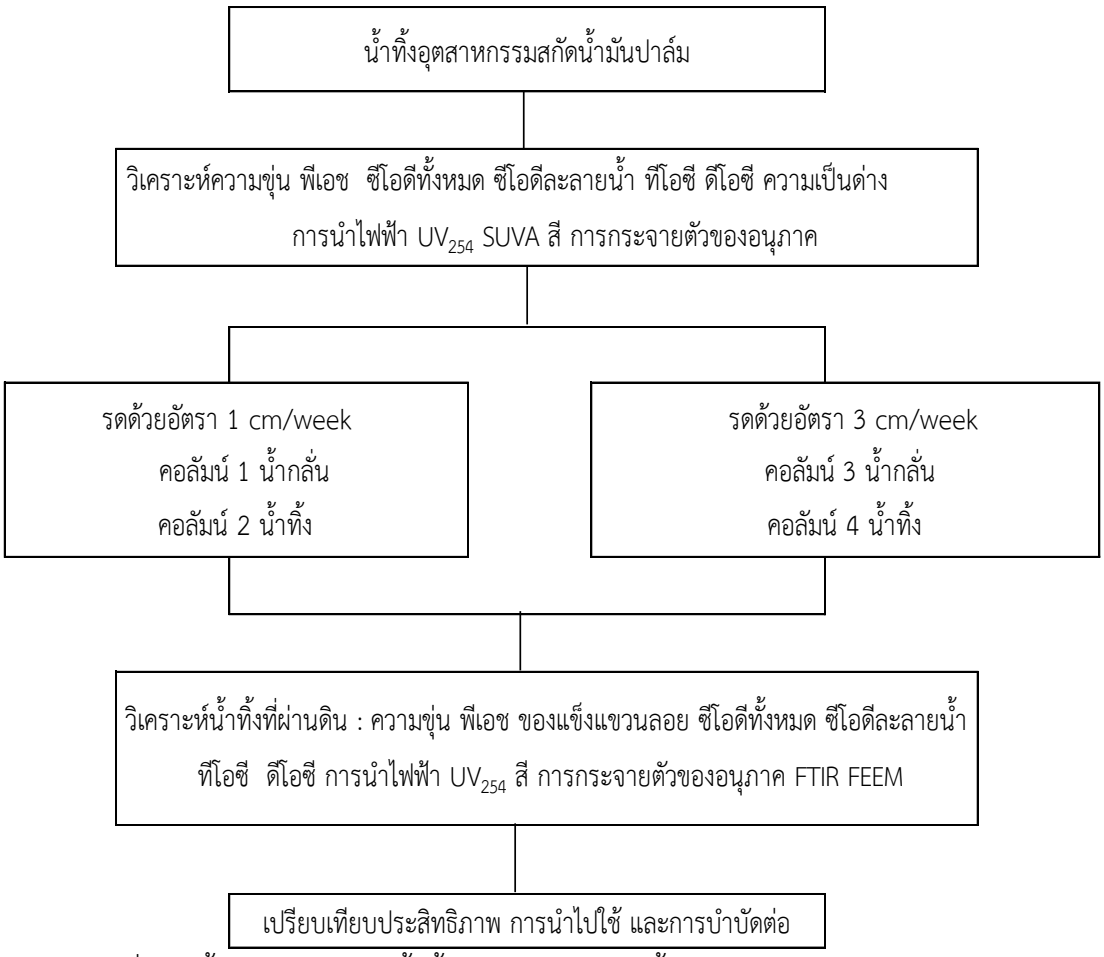
รูปที่ 3.5 คอลัมน์การบำบัดโดยดิน

ตารางที่ 3.1 อัตราและความถี่การเติมน้ำในการบำบัดโดยดิน

ประเภทคอลัมน์	อัตราการเติมน้ำ (cm/week)	ปริมาณการเติมน้ำ (mL/d)	สัญลักษณ์
ชุดควบคุม : เติมน้ำกลั่นในคอลัมน์ทุกวัน	1	72	WATER - 1
ชุดทดลอง : เติมน้ำทิ้งในคอลัมน์ทุกวัน			POME - 1
ชุดควบคุม : เติมน้ำกลั่นในคอลัมน์ทุกวัน	3	217	WATER - 3
ชุดทดลอง : เติมน้ำทิ้งในคอลัมน์ทุกวัน			POME - 3

3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในคอลัมน์

วิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดโดยดินทั้งสองอัตรา เพื่อหาความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ หรือนำไปบำบัดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดิน

3.2.4 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

1) นำน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยการโคแอกกูเลชัน และการบำบัดโดยดินผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน แบบ Dead –End ดังแสดงในรูปที่ 3.7
   - นำน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยการโคแอกกูเลชัน และการบำบัดโดยดิน มาผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ขนาดรูพรุน 0.45 μm ที่มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.12 เดินระบบด้วยความดัน 1 bar
   - เก็บน้ำที่ผ่านการกรองไว้บนบีกเกอร์ที่วางอยู่บนเครื่องชั่ง
   - บันทึกน้ำหนักของน้ำที่ผ่านการกรองที่เวลาต่างๆ
   - นำค่าน้ำหนักน้ำที่ได้ มาคำนวณหาค่าฟลักซ์ และความต้านทานของเมมเบรน ดังสมการที่ 3.1 – 3.4
   - หลังจากนั้นนำน้ำที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ไปวิเคราะห์ความขุ่น ซีโอดี ขนาดอนุภาคเฉลี่ย สี ของแข็งละลายน้ำ UV_{254} พร้อมทั้งนำแผ่นไมโครฟิลเตรชันไปวิเคราะห์ EDX และ SEM ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ทดลองเมมเบรนแบบ dead – end

ความต้านทานของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (membrane resistance; R_m)

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w} \quad (3.1)$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (m^{-1})

ΔP = ความดันที่ให้ระบบ (Pa)

μ_w = ความหนืดของน้ำสะอาด (Pa.s) มีค่า 8.9793×10^{-4} Pa.s

J_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดก่อนการใช้งาน (m^3/m^2s)

ความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง

$$R_m + R_f = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w'} \quad (3.2)$$

เมื่อ $R_m + R_f$ = ความต้านทานของเมมเบรนรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง

J_w' = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเมมเบรนและล้างด้วยน้ำสะอาดแล้ว (m^3/m^2s)

ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f)

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m \quad (3.3)$$

ความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance, R_p)

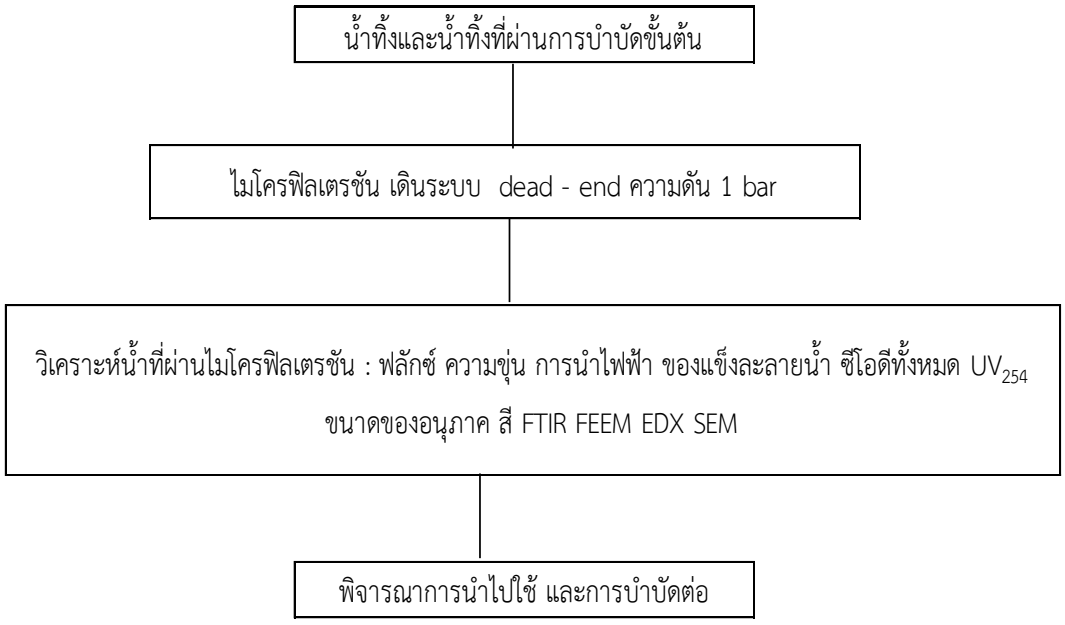
$$R_p = R_t - (R_m + R_f) = \frac{\Delta P}{\mu J} - (R_m + R_f) \quad (3.4)$$

เมื่อ R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหล (m^{-1})

ΔP = ความดันที่ให้ระบบ (Pa)

μ = ความหนืดของน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรน (Pa.s)

J = ฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรน (m^3/m^2s) (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2542)



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรน

3.3 วิธีการวิเคราะห์

1) พีเอช (pH)
วิธีวัดดังระบุใน Standard method 4500-H^+ B. Electrometric Method วัดด้วย pH meter ยี่ห้อ mettle Toledo

2) ความขุ่น (Turbidity)
วิธีวัดดังระบุใน Standard method 2130B. Nephelometric Method วัดด้วย Turbidity meter HACH รุ่น 2100 N

3) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid)
วิธีวัดดังระบุใน Standard Method 2540B. Total Suspended Solids อบแห้งที่ 103 – 105°C

4) ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solid)
วัดด้วย Conductivity instrument 3200 YSI

5) ซีโอดีทั้งหมด (Total chemical oxygen demand; TCOD)
วิธีวัดดังระบุใน Standard Method 5220C. Closed Reflux, Titrimetric Method

6) ซีโอดีละลายน้ำ (Dissolved chemical oxygen demand; SCOD)
วิธีวัดดังระบุใน Standard Method 5220C. Closed Reflux, Titrimetric Method โดยน้ำตัวอย่างต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm

7) UV absorbance at wavelength 254 nm (UV_{254})
วัดด้วย GENESYS 10S UV-Vis spectrophotometer โดยน้ำตัวอย่างต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm

8) ความเป็นด่าง (Alkalinity)
วิธีวัดดังระบุใน Standard Method 2320B. Titration Method

9) การนำไฟฟ้า (Conductivity)
วัดด้วย Conductivity instrument 3200 YSI

10) ทีโอซี (Total organic carbon; TOC)

วิธีวัดดังระบุใน Standard Method 5310B. High-Temperature Combustion Method

11) ดีโอซี (Dissolved organic carbon; DOC)

วิธีวัดดังระบุใน Standard Method 5310B. High-Temperature Combustion Method โดยน้ำตัวอย่างต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm

12) Specific ultraviolet absorption (SUVA)

เป็นดัชนีชี้วัดสารอินทรีย์กลุ่ม Humic โดยคำนวณจากค่า UV-254 (cm^{-1}) หารด้วยค่า DOC (mg/L)

13) สี (Color)

กรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง GENESYS 10S UV-Vis spectrophotometer สำหรับหน่วย Pt-Co และ เครื่อง DR 6000™ UV VIS Spectrophotometer with RFID Technology สำหรับหน่วย ADMI

14) ขนาดอนุภาค (Particle size)

ใช้เครื่องมือ Zeta potential analyzer, Model ZetaPALS, Brookhaven, USA

15) Fluorescence excitation emission matrix (FEEM)

สภาวะการทำงานของเครื่อง Spectrofluorometer, Jasco FP-6200

Measurement mode: Emission
Excitation band width: 5 nm
Emission band width: 5 nm
Response: Medium
Sensitive: Medium
Excitation wavelength: 220 – 600 nm
Start: 220 nm
End: 600 nm
Data pitch: 1 nm
Scanning speed: 1000 nm/min

ขั้นตอนการวัดน้ำตัวอย่าง

- นำน้ำตัวอย่างผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/F รูพรุน 0.7 µm และปรับพีเอชให้มีค่าเป็นกลาง (เท่ากับ 7)
- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่อง Spectrofluorometer ก่อนการทำงาน 1 ชั่วโมง
- นำสารมาตรฐาน Quinnine sulfate ที่ความเข้มข้น 10 µg/L ใส่ในคิวเว็ต เพื่อวัดความเข้มแสงที่ Em 450 nm และ Ex 345 nm
- วัดค่า FEEM ของน้ำ milli Q ที่ Ex ตั้งแต่ 220 – 600 nm โดยเปลี่ยนทุกๆความถี่ 10 nm ในหนึ่งค่า Ex ทำการวัด Em 220 – 600 nm
- วัดค่า FEEM ของน้ำตัวอย่าง ที่ Ex ตั้งแต่ 220 – 600 nm โดยเปลี่ยนทุกๆความถี่ 10 nm ในหนึ่งค่า Ex ทำการวัด Em 220 – 600 nm
- นำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลใน model ที่สร้างจาก Excel และมาสร้างเป็นกราฟ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Sigma plot แล้วนำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.4

16) ค่าดัชนีตะกอน (Silt density index, SDI)

เพื่อประเมินการนำน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อนเข้าระบบเมมเบรน ตามหลักของ D 1129 ASTM Standard

- วาง membrane filter ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm รูพรุน 0.45 µm ลงในอุปกรณ์หาดัชนีตะกอน
- เติมน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันลงในอุปกรณ์ ขับเคลื่อนด้วยความดัน 350 kPa หรือ 3.5 bar เริ่มจับเวลาจนปริมาตรน้ำออกเป็น 500 mL (T_0) โดยควบคุมความดันให้คงที่ตลอดเวลา กรองน้ำต่อไปจนครบ 15 min
- ทำการกรองอีกครั้ง โดยไม่ต้องเปลี่ยน membrane filter จับเวลาเป็นจนน้ำปริมาตร 500 mL (T_1) แล้วมาคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$SDI = \left[1 - \frac{\left(\frac{T_0}{T_1}\right)}{15} \right] \times 100$$

โดย T_0 = เวลา (s) ที่ใช้ในการกรองน้ำครั้งแรกให้ได้ปริมาตร 500 mL

T_1 = เวลา (s) ที่ใช้ในการกรองน้ำให้ได้ปริมาตร 500 mL หลังจากกรองครบ 15 min

17) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
จำแนกหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยใช้เครื่องมือ Fourier transform infrared spectroscopy, EQUINOX 55, Bruker, Germany เทคนิค Pellet KBr ในช่วงสเปกตรัมคือ Middle Infrared Region Wavenumber (MIR) ที่ 4,000 - 400 cm^{-1} แล้วเทียบกับตารางที่ 2.7

18) Scanning Electron Microscopy (SEM)
วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศ์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope Quanta400 เพื่อดูโครงสร้างของชั้นผิว

19) Energy – Dispersive X – ray spectroscopy (EDX)
วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศ์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope Quanta400 เพื่อคำนวณธาตุเชิงปริมาณ

20) จำแนกดินแบบระบบ Unified
ใช้วิธี ASTM D-2487 โดยร่อนตัวอย่างดินผ่านตะแกรง เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 แล้วชั่งน้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ เพื่อนำไปเทียบกับตารางที่ 2.10

21) จำแนกดินแบบแผนภูมิสามเหลี่ยม
ร่อนตัวอย่างดินผ่านตะแกรง เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อหาร้อยละของดินแต่ละประเภท แล้วนำไปเทียบกับรูปที่ 2.11

22) ความชื้นในดิน
ใช้วิธี ASTM D 2216 - 98 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass โดยใช้ตู้อบ ยี่ห้อ Wiseven

23) ความถ่วงจำเพาะของดิน
ใช้วิธี ASTM D 854 – 00 Standard Test Methods for Specific Gravity Of Soil Solids By Water Pycnometer

24) ค่าพีเอชในดิน
ใช้น้ำกลั่นอัตราส่วนดิน : น้ำ = 1:1 กวนประมาณครึ่งชั่วโมง แล้ววัดโดยใช้ pH meter ยี่ห้อ mettle Toledo

ที่มา: Standard method for the examination of water & wastewater 21st edition, 2005

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวอย่างน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่ง ในอำเภอสิเกา จังหวัดตรัง ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแบบเปียก จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียด้วยพารามิเตอร์เบื้องต้น พบว่าน้ำเสียมีอุณหภูมิสูง สีน้ำตาลดำเข้ม ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4 - 5 ของแข็งแขวนลอย 25 – 26 g/L ซีโอดีทั้งหมด 58 – 60 g/L น้ำมันและไขมัน 2.8 – 3.0 g/L ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยอื่นๆ ที่วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทย (Kongnoo *et al*., 2012; Laohaprapanon *et al*., 2005) จากลักษณะสมบัติดังกล่าว น้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจึงจำเป็นจะต้องทำการบำบัดก่อนจะปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยวิธีการบำบัดที่อุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้คือระบบบำบัดแบบบ่อ เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบไม่สูงมากนัก (Wong, 1980) ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ทำการวิจัยก็เช่นกัน มีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบบ่อ ทั้งแบบไร้อากาศและเติมอากาศจำนวน 15 บ่อต่อเนื่องกัน ก่อนจะปล่อยน้ำทิ้งรดสวนปาล์ม เนื่องจากน้ำที่ผ่านการบำบัดไม่สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ว่า ในกรณีที่ไม่สามารถระบายน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงได้ จะต้องทำการปรับสภาพน้ำทิ้งแล้วไปใช้เพื่อการเกษตรในพื้นที่รอบโรงงานหรือพื้นที่ที่ได้รับการยินยอมเท่านั้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2557) ซึ่งจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของน้ำทิ้ง พบว่าในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มนั้นยังคงมีสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 หากปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำจะเกิดมลพิษทำให้เป็นที่พึงรังเกียจ แหล่งน้ำเน่าเสีย และไปบดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลกระทบทั้งต่อพืชและสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ (Ahmad *et al*., 2006; Neoh *et al*., 2012) ซึ่งสีดังกล่าวนั้นเกิดจากรงควัตถุ หรือสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน เช่น แคโรทีนอยด์ ฟีนอลิก ลิกนิน แทนนิน โพลีฟีนอล เซลลูโลส และเมลานอยดิน (Ahmad *et al*., 2008; Igwe and Onyegbado, 2007; Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010; Rakamthong and Prasertsan, 2011) แต่หากต้องการระบายน้ำทิ้ง จะต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งให้มีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

รูปที่ 4.1 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

นอกจากลักษณะทางกายภาพแล้ว ได้นำน้ำทิ้งมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี แสดงผลดังในตารางที่ 4.1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์ข้างต้น พบว่าระบบบำบัดแบบบ่อของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งนี้มีประสิทธิภาพทำให้อุณหภูมิลดลง ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น สามารถลดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 90 แต่พบว่าลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งนั้นก็ยังไม่เหมาะสมที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยตรง เนื่องจากมีบางพารามิเตอร์ที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ คือ ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และซีโอดี อีกทั้งมีร่างประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่กำหนดค่าสีในน้ำทิ้งให้มีค่าไม่เกิน 300 ADMI (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558) เนื่องจากสีเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สามารถบ่งชี้การหลงเหลือของกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์น้ำทิ้งพบว่า มีค่าสีสูงถึง 1,600 – 1,700 ADMI ดังแสดงในตารางที่ 4.1 หากต้องการให้มีค่าไม่เกิน 300 ADMI ต้องทำการเจือจางถึง 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แต่วิธีเจือจางนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ เนื่องจากกระทรวงอุตสาหกรรม (2539) ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)”

เจือจาง	ค่าสี (ADMI)
(a) ไม่เจือจาง	1,700
(b) 1.25 เท่า	1,500
(c) 1.6 เท่า	1,300
(d) 2.5 เท่า	1,000
(e) 5 เท่า	600
(f) 10 เท่า	300
(g) 20 เท่า	150
(h) น้ำกลั่น	1

รูปที่ 4.2 ค่าสี (ADMI) ของการเจือจางน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่าที่วิเคราะห์ได้	*มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง
อุณหภูมิ (temperature)	$^{\circ}C$	25 - 28	ไม่เกิน 40
พีเอช (pH)	-	8.3 – 8.5	5.5 – 9.0
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	110 -130	-
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)	mg/L as $CaCO_3$	2,500 – 4,000	-
สี (Color)	Pt- Co	550 – 600	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
	ADMI	1,600 – 1,700	
UV_{254} (UV absorbance at 254 nm)	cm^{-1}	10 - 12	-
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	mS/cm	7 - 8	-
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid)	mg/L	170 - 250	ไม่เกิน 50
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solid)	mg/L	5,000 – 5,500	ไม่เกิน 3,000
ซีโอดีทั้งหมด (Total chemical oxygen demand)	mg/L	900 – 1,300	ไม่เกิน 120
ซีโอดีละลายน้ำ (Soluble chemical oxygen demand)	mg/L	600 - 800	-
ทีโอซี (Total organic carbon)	mg/L	600 - 700	-
ดีโอซี (Dissolve organic carbon)	mg/L	180 - 220	-
SUVA (Specific UV absorbance at 254 nm)	L/mg-m	4.5 – 6.7	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Particle size)	µm	21 - 22	-

ที่มา: * กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (2539)

4.1.1 **กลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม**

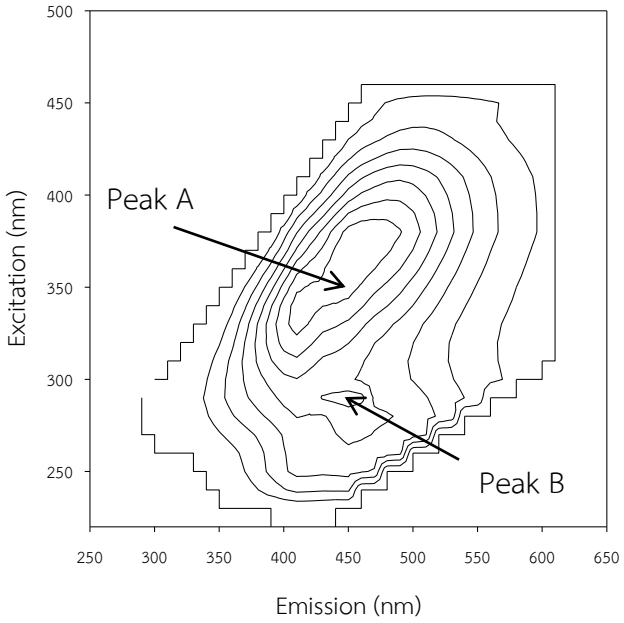
จากรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีสีน้ำตาล เกิดจากการปนเปื้อนของกลุ่มสารอินทรีย์ (Ahmad *et al*., 2008; Igwe and Onyegbado, 2007; Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010; Rakamthong and Prasertsan, 2011) จึงทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆที่สามารถบ่งชี้ถึงการมีกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง พบว่า UV_{254} มีค่า 10 - 12 cm^{-1} ซีโอดี 900 – 1,300 mg/L ทีโอซี 600 – 700 mg/L และดีโอซี 180 – 220 mg/L ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งทั้งซีโอดีและทีโอซีเป็นวิธีการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ในน้ำ โดยซีโอดีจะมีค่าสูงกว่าทีโอซี เนื่องจากซีโอดีจะหาจากปริมาณออกซิเจนที่ใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาจจะย่อยสารอนินทรีย์อื่นๆ ที่อยู่ในน้ำด้วยจึงทำให้มีค่าสูงกว่า ทีโอซีที่จะหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาสารอินทรีย์ในน้ำโดยตรง (APHA, 2005; CBCL limited consulting engineer, 2011) และจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์เหล่านี้ยังพบว่ามีความสัมพันธ์กัน ดังการศึกษาของ มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, (2547) ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีและทีโอซีของสารแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ในรูปของอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อทีโอซี (COD/TOC) ซึ่งเมื่อนำค่าซีโอดีและทีโอซีที่วิเคราะห์ได้จากน้ำทิ้ง มาหาความสัมพันธ์ พบว่า COD/TOC มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 2.1 สอดคล้องกับการวิจัยของ Eckfelder and Ford (1970) ที่พบว่า COD/TOC ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.75 – 6.65 นี้จะแสดงถึงการมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้ง

หลังจากนั้นได้คำนวณหาค่า SUVA ที่เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่บ่งชี้การมีกลุ่มสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter; NOM) พบว่าในน้ำทิ้งมีค่า SUVA 4.5 – 6.7 L/mg-m ซึ่งมีค่ามากกว่า 4 L/mg-m แสดงถึงการมีสารอินทรีย์กลุ่ม humic เป็นส่วนใหญ่ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) สูง คือไม่ละลายในน้ำ และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่นพวกหมู่ฟังก์ชัน aromatic (Edzwald and Benschoten, 1990; Swietlik and Sikorska, 2005; Owen *et al*., 1993) นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์สารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM) โดยการส่องผ่านของแสงฟลูออเรสเซนท์ ในช่วงความยาวคลื่น 220 – 600 nm พบว่า ปรากฏพีค 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งพีค A Ex_{max} / Em_{max} = 360 nm / 450 nm มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ 78.2 QSU และตำแหน่ง B Ex_{max} / Em_{max} = 290 nm / 450 nm มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ 42.7 QSU ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปที่ 2.4 ทั้งสองตำแหน่งที่ปรากฏจัดอยู่ในสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภทที่ 5 คือ humic acid – like คือมีค่า excitation wavelengths มากกว่า 280 nm และ emission wavelengths มากกว่า 380 nm โดยสารอินทรีย์ประเภทนี้สามารถพบกลุ่ม hydrophobic acids และ fulvic acid – like ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kongnoo *et al*. (2011) ที่ตรวจพบสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid และ fulvic acid ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค FEEM เช่นกัน จึงสามารถอธิบายได้ว่าในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบบ่อจะยังคงหลงเหลือสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกที่ละลายและไม่ละลายน้ำ ซึ่งสารอินทรีย์ที่ตรวจพบเป็นสาเหตุของการเกิดสีในน้ำทิ้ง โดยกลุ่ม humic acid จะทำให้เกิดสีน้ำตาลถึงดำ ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน H-bonded, O-H stretching ของ carboxyl, phenol และ alcohol หมู่ฟังก์ชัน aliphatic C–H และหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching

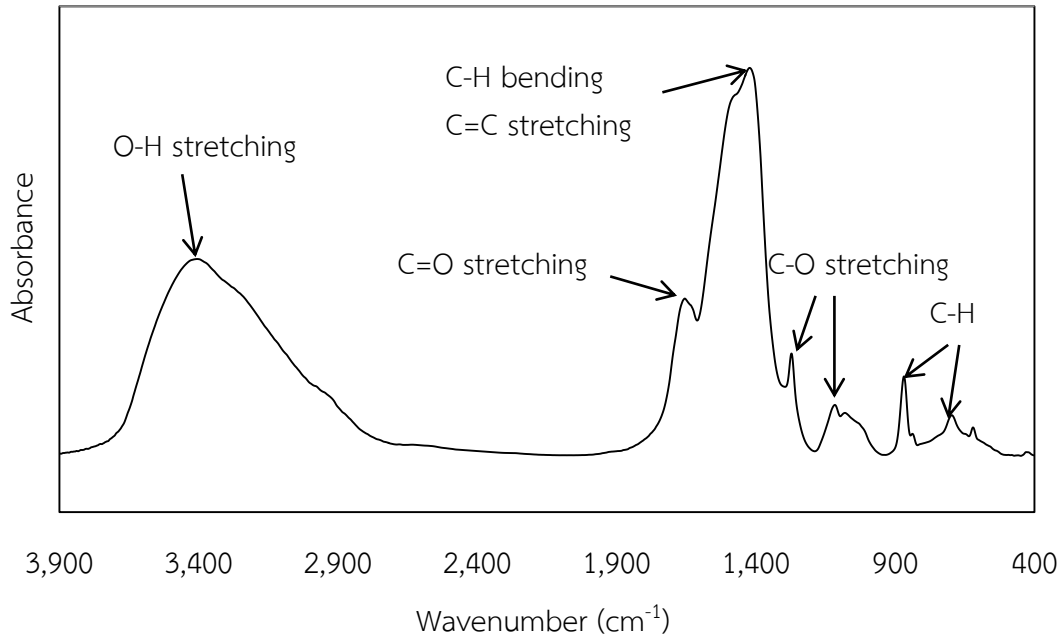
ส่วนกลุ่ม fulvic acid ทำให้เกิดสีเหลืองอ่อนถึงสีเหลืองน้ำตาล จะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันพวก aromatic น้อยกว่าพวก humic acid – like แต่จะพบหมู่ฟังก์ชัน Carboxyl และ Hydroxyl มากกว่า (Stevenson, 1982; Pettit, 2004; Shin *et al*., 1999) กลุ่ม humic acid ส่วนใหญ่จึงมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่ากลุ่ม fulvic acid ดังนั้นการที่น้ำทิ้งปรากฏเป็นสีน้ำตาลจึงเกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid เป็นส่วนใหญ่ จำพวกหมู่ฟังก์ชัน aromatic ซึ่งสอดคล้องกับค่า SUVA และ FEEM ของน้ำทิ้ง ที่แสดงถึงการมีสารอินทรีย์ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในกลุ่ม humic เป็นส่วนใหญ่ หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งเทียบกับตารางที่ 2.7 ซึ่งจะพบทั้งหมู่ฟังก์ชัน aromatic และ aliphatic คือที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ของพวก aromatic hydroxyl group ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ของพวก carboxyl ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ C=C stretching ความถี่ 1,272, 1,116 และ 1,080 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันที่พบในกลุ่มของ humic acid ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล (Stevenson, 1982; Pettit, 2004; Shin *et al*., 1999)

โดยหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบในน้ำทิ้งนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถพบได้ในรงควัตถุที่ทำให้เกิดสีในน้ำทิ้ง เช่น ลิกนิน โพลีแซคคาไรด์ โปรตีนจากพืช และเฮมิเซลลูโลส ดังผลการวิจัยของ Alriols *et al*. (2009) ที่ทำการวิเคราะห์ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจากทะลายปาล์มเปล่า โดยในลิกนินตรวจพบที่ความถี่ 1,600, 1,515 และ 1,425 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic phenyl propane ความถี่ 3,400 และ 1,030 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic และ aliphatic hydroxyl ความถี่ 2,925, 2,850 และ 1,460 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-H aliphatic bonds ความถี่ 1,450 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม aromatic methyl ความถี่ 1,365 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม phenolic hydroxyl และ ความถี่ 1,715 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม non-conjugated carbonyl ส่วนเฮมิเซลลูโลส ตรวจพบความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม O-H ความถี่ 2,920 และ 1,470 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-H stretching ของ methyl หรือ methylene ความถี่ 1,740 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม acetyl และ uronic ester ความถี่ 1,640 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C=O stretching และความถี่ 1,200 – 1,000 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-OH และ C-O-C

และจากผลการวิจัยของ Buharuddin *et al*. (2011) ที่ทำการวิเคราะห์น้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่าในน้ำเสียประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินร้อยละ 36.7, 21.5 และ 28 ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จะตรวจพบความถี่ 1,033 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่พบได้ในโพลีแซคคาไรด์ และแร่ดินเหนียว ความถี่ 1,130 และ 1,260 cm^{-1} พบได้ในลิกนิน (Matias *et al*., 2000) ความถี่ 1,449 และ 1,417 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H bending ความถี่ 1,650 cm^{-1} พบได้ในโปรตีนของเปลือกพืช ความถี่ 2,925 และ 2,855 cm^{-1} จัดเป็นพวก aliphatic methylene ที่พบได้ในไขมัน และความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน hydroxyl ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับผล FTIR ของน้ำทิ้งที่ได้จากการวิเคราะห์ เห็นได้ว่าจะไม่ปรากฏตำแหน่งความถี่ 2,925 และ 2,855 cm^{-1} ที่เป็นพวกไขมันในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม แสดงว่าระบบบำบัดแบบบ่อของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งนี้ สามารถกำจัดไขมันในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.3 การจำแนกน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM)



รูปที่ 4.4 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

นอกจากสารอินทรีย์ที่ตรวจพบได้ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแล้ว ยังพบกลุ่มสารอนินทรีย์ จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้น พบว่า มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.3 – 8.5 ทำให้น้ำทิ้งมีสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) สูง คือ 2,500 – 4,000 mg/L as $CaCO_3$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าความเป็นด่างที่วิเคราะห์ได้นั้นอาจเกิดจากกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มที่มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน), 2557) จึงทำให้มีอิออนของไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนตปนเปื้อนมากับน้ำทิ้ง น้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจึงมีสภาวะเป็นด่างสูง ซึ่งทำให้หมู่ฟังก์ชัน aromatic และ aliphatic ที่พบในสารอินทรีย์อยู่ในรูปละลายน้ำมากขึ้น (Pettit, 2004)

จากลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ทำการวิเคราะห์ข้างต้น เห็นได้ว่า น้ำทิ้งจะมีค่าพีเอชค่อนไปทางด่าง ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และซีโอดี ยังมีค่าสูงเมื่อเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 อีกทั้งน้ำทิ้งมีการปนเปื้อนของกลุ่มสารอินทรีย์พวก humic ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ เช่น aromatic จึงเป็นสาเหตุทำให้ปรากฏสีน้ำตาลในน้ำทิ้ง โดยหมู่ฟังก์ชัน aromatic นี้ เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน การบำบัดแบบบ่อที่อาศัยกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพจึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ไม่ดีเท่าที่ควร และเนื่องจากน้ำทิ้งมีค่าความเป็นด่างสูง สารอินทรีย์เหล่านี้จะอยู่ในรูปละลายน้ำมากขึ้น ทำให้กำจัดออกได้ยากมากขึ้นอีก ดังนั้น การปล่อยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจึงยังไม่เหมาะสม เพราะจะไปบดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย ส่งผลกระทบพืชและสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ จึงควรมีการบำบัดเพิ่มเติมเพื่อจะปล่อยทิ้งหรือหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่ามีวิธีการบำบัดที่หลากหลายทั้งกายภาพ เคมี ชีวภาพหรือแม้กระทั่งการใช้เมมเบรน โดยในงานวิจัยนี้เลือกที่จะบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน การบำบัดโดยดิน และเมมเบรน ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีกลไกในการบำบัด ข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน โดยจะกล่าวถึงในผลการวิจัยต่อไป

4.2 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

จากผลการวิเคราะห์น้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เห็นได้ว่ามีปริมาณของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่สูง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทำให้เกิดปัญหาของสีในน้ำทิ้ง จึงไม่สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท ได้แก่ โรงงานผลิตสี โรงงานสิ่งทอ โรงงานฟอกย้อม โรงงานสารเคมี และโรงงานสกัดน้ำมัน เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยที่ทำการบำบัดน้ำเสียของโรงงานเหล่านี้ พบว่ามีการเลือกใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสีได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) อย่างเช่น การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับพอลิเมอร์ พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่แตกต่างกัน คือ ลดความขุ่นได้ร้อยละ 58 ลดค่าสี และซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80 (สุปรีดา วัชรจิรโสภณ และ นันทนา ดาโอะ, 2554) บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีประเภทสีน้ำ มีการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 500 mg/L ควบคุมพีเอช 7 พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ของแข็งแขวนลอย และความขุ่นมากกว่าร้อยละ 99 และบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 76.8 (ศักดิ์ชัย ชื้อวัฒนานุกูร, 2539) น้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ เลือกใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ ความเข้มข้น 750 – 1,000 mg/L ควบคุมพีเอช 8.5 – 9 สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 70.88 ความขุ่นร้อยละ 89.62 ซีโอดีร้อยละ 36.7 และถ้าเปลี่ยนมาใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ จะต้องใช้ความเข้มข้น 3.6 g/L ควบคุมพีเอช 9 ทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น คือบำบัดสีได้ร้อยละ 72.7 ความขุ่นร้อยละ 97.1 และซีโอดีร้อยละ 37.4 (วาริท เจาะจิตต์, 2541) จากงานวิจัยข้างต้น เห็นได้ว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ และสีทั้งสีจริงหรือสีปรากฏในน้ำทิ้งได้จริง ในสภาวะที่แตกต่างกัน ทั้งประเภทของสารสร้างตะกอน ความเข้มข้น และพีเอชที่ควบคุม เป็นต้น

4.2.1 ความเข้มข้นและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

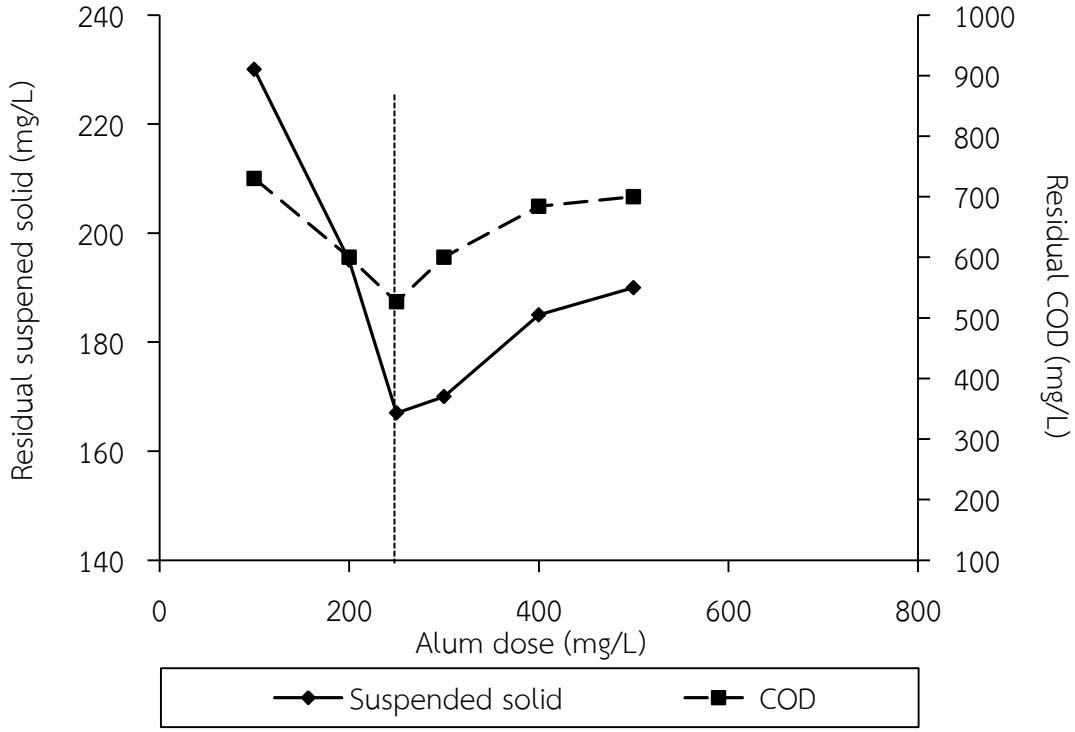
จากลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่วิเคราะห์ได้ในตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าน้ำทิ้งมีค่าความขุ่นต่ำอยู่ในช่วง 110 – 130 NTU ในการจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่มาสัมผัสกันในกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้นทำได้ยาก ยิ่งหากต้องการให้เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก หรือที่เรียกว่า Sweep coagulation ด้วยแล้ว จะต้องใช้สารสร้างตะกอนที่มีความเข้มข้นสูง ถึงจะเกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ (metal hydroxide) ได้ (Wang *et al*., 2004) ซึ่งโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชัน หากมีการใช้สารสร้างตะกอนที่ความเข้มสูง จำเป็นจะต้องปรับพีเอชให้มีค่าความเป็นด่างที่เพียงพอ เนื่องจากในกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้นความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่ต้องเติมลงไปจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นด่างในน้ำ คือ ในการเติมสารส้ม 1 mg/L ควรมีค่าความเป็นด่างในน้ำ 0.5 mg/L as $CaCO_3$ จึงจะเพียงพอ (Edzwald *et al*., 1998; Howe and Clark, 2002) แต่จากการวิเคราะห์น้ำทิ้ง พบว่าน้ำทิ้งมีค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 2,500 – 4,000 mg/L as $CaCO_3$ ซึ่งมีค่าสูงอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับความเป็นด่างในน้ำ ดังนั้นในการเติมสารส้มจึงควรใช้ที่ความเข้มข้นประมาณ 5,000 – 8,000 mg/L หรือ 5 – 8 g/L ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Hassan and Puteh (2007) ที่บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้สารส้มความเข้มข้นที่ 8 g/L

$$2{,}500\ \text{mg/L as } CaCO_3 \times \frac{1\text{mg/L of Alum}}{0.5\ \text{mg/L as } CaCO_3} = 5{,}000\ \text{mg/L of Alum} \quad (4.1)$$

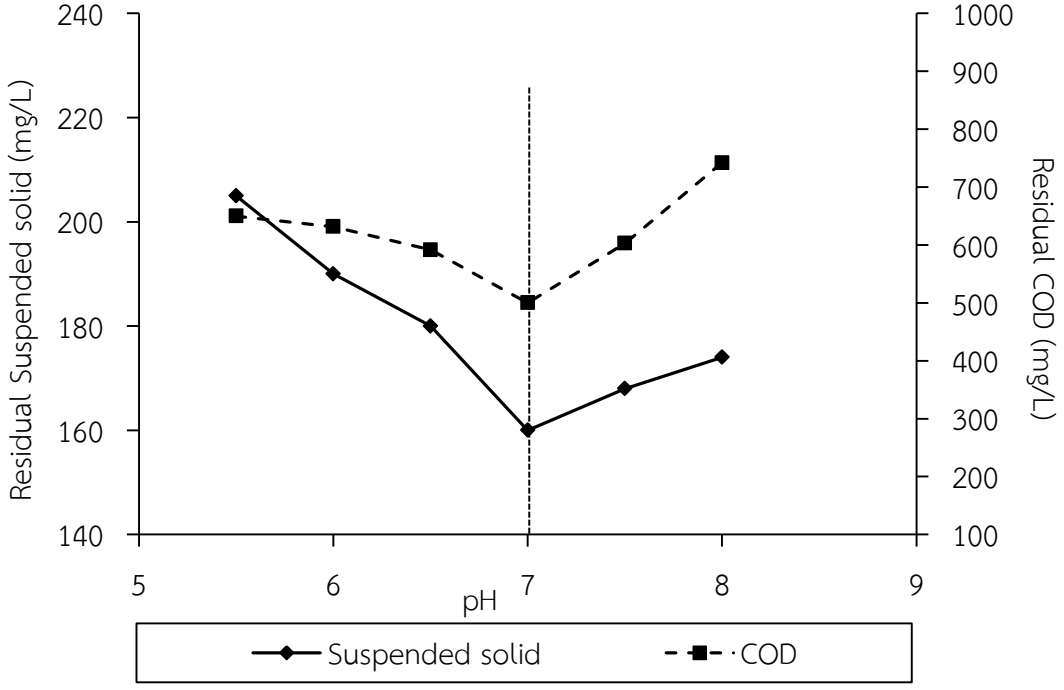
โดยในการทดลองเลือกใช้สารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือ สารส้ม (Aluminium sulfate; Alum) และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride; PACl) ทำการทดลองในช่วงที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าที่ประมาณไว้และความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่ประมาณไว้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัด โดยอาจดูจากหลายๆปัจจัยร่วมกัน เช่น 1) ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีที่ดีที่สุด 2) เกิดตะกอนจากการบำบัดน้อย 3) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ 4) มีสารสร้างตะกอนตกค้างน้อย (Edzwald ans Tobiason, 1999) ซึ่งในขั้นตอนการทดลองนี้จะพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดี ดังนี้

การทดลองบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารสร้างตะกอนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าช่วงที่ประมาณไว้ คือ 5,000 – 8,000 mg/L ในการทดลองแรกจะหาความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน เนื่องจากในน้ำทิ้งมีค่าความเป็นด่างสูง การควบคุมพีเอชจึงใช้การเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ คือ 5 – 7 และ 5 - 8 ตามลำดับ (Metcalf & Eddy, 2004; Gilbert *et al*., 1976) ซึ่งในการทดลองหาความเข้มข้นของสารส้มจะควบคุมให้มีค่าพีเอชในช่วง 5.5 – 6.5 พบว่าสารส้มที่ความเข้มข้น 250 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดีได้ดี คือร้อยละ 45.1 และ 50.0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่วนการหาความเข้มข้นของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะควบคุมพีเอชในช่วง 6 -7 พบว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 400 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีได้ดี คือร้อยละ 39.3 และ 60.6 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

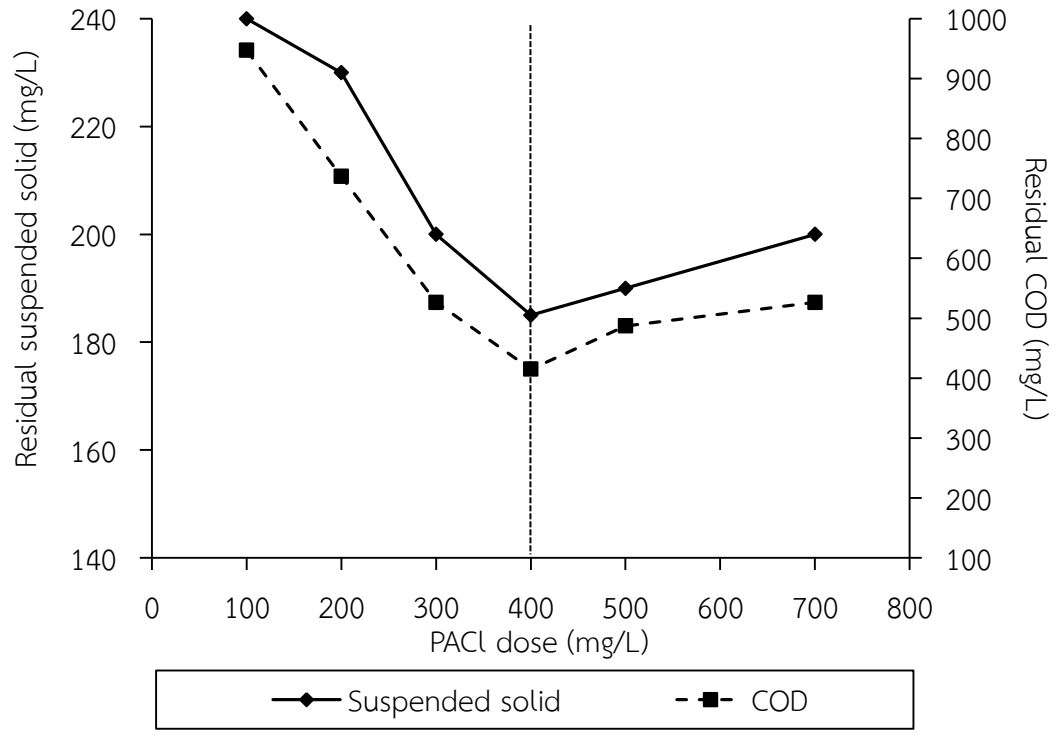
หลังจากนั้นจึงทำการทดลองที่สองคือการหาค่าพีเอชในกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่า สารส้มที่ความเข้มข้น 250 mg/L ควรควบคุมพีเอชให้มีค่า 7 คือต้องเติม HCl 1 N ประมาณ 17 mL/L จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีได้ดี คือร้อยละ 47.5 และ 52.5 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ส่วนโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 400 mg/L ควรควบคุมพีเอชให้มีค่า 8 คือต้องเติม HCl 1 N ประมาณ 8 mL/L จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีได้ดี คือร้อยละ 44.3 และ 66.7 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองดังกล่าว เห็นได้ว่าการใช้สารสร้างตะกอนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าช่วงที่ประมาณไว้ โดยควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีในน้ำทิ้งได้ เนื่องจากในช่วงพีเอชที่เหมาะสม กระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ที่จะรวมตัวกับอนุภาคในน้ำทิ้ง แล้วตกตะกอนสู่ด้านล่างได้



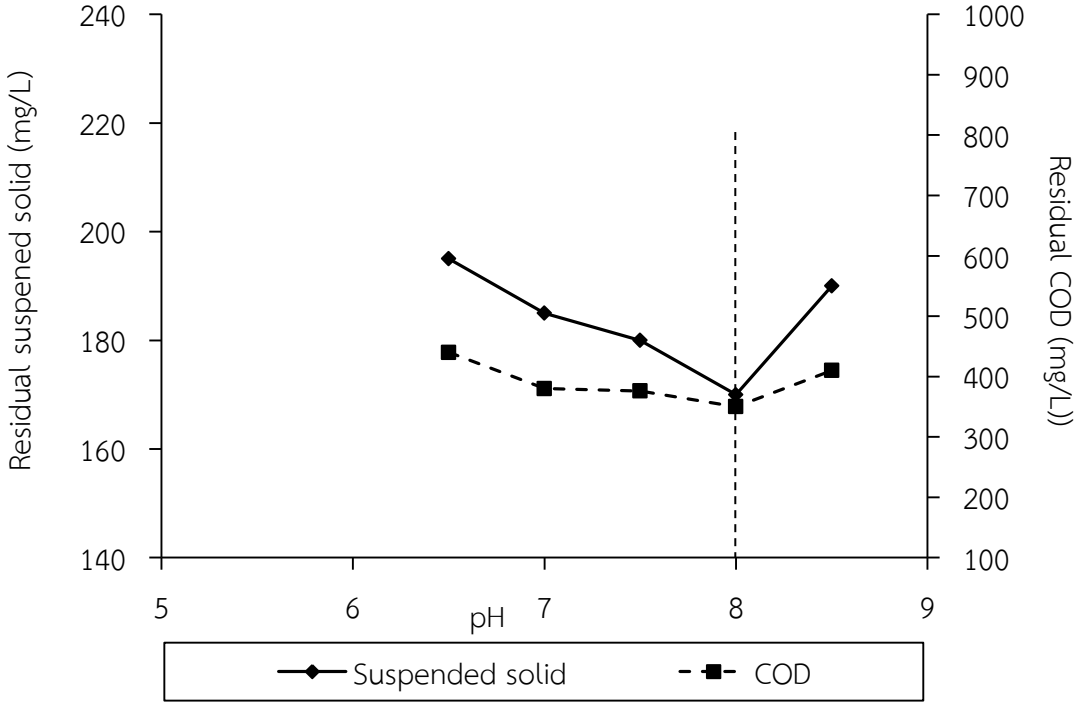
รูปที่ 4.5 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 5.5 – 6.5



รูปที่ 4.6 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 250 mg/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ

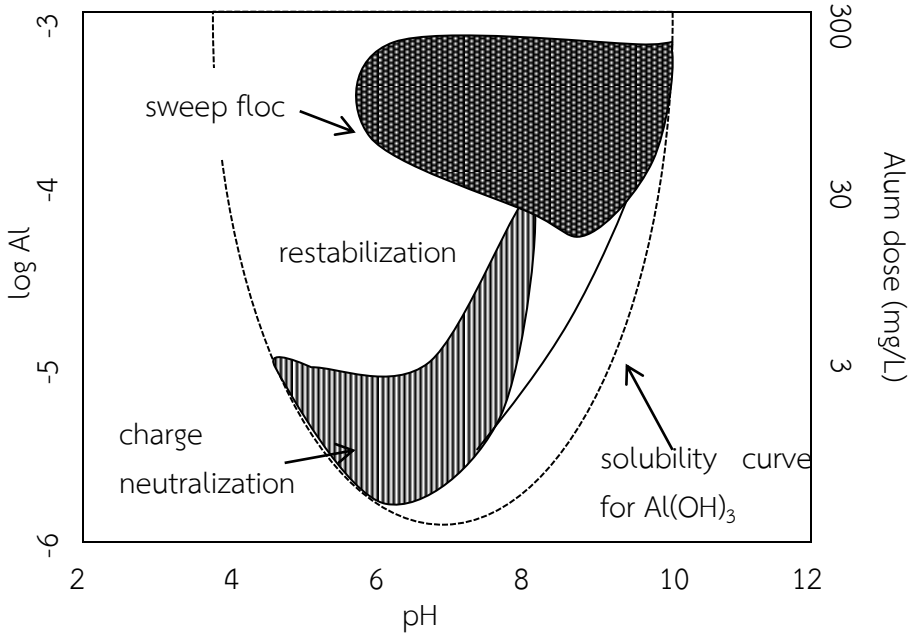


รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 6 - 7



รูปที่ 4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 400 mg/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ

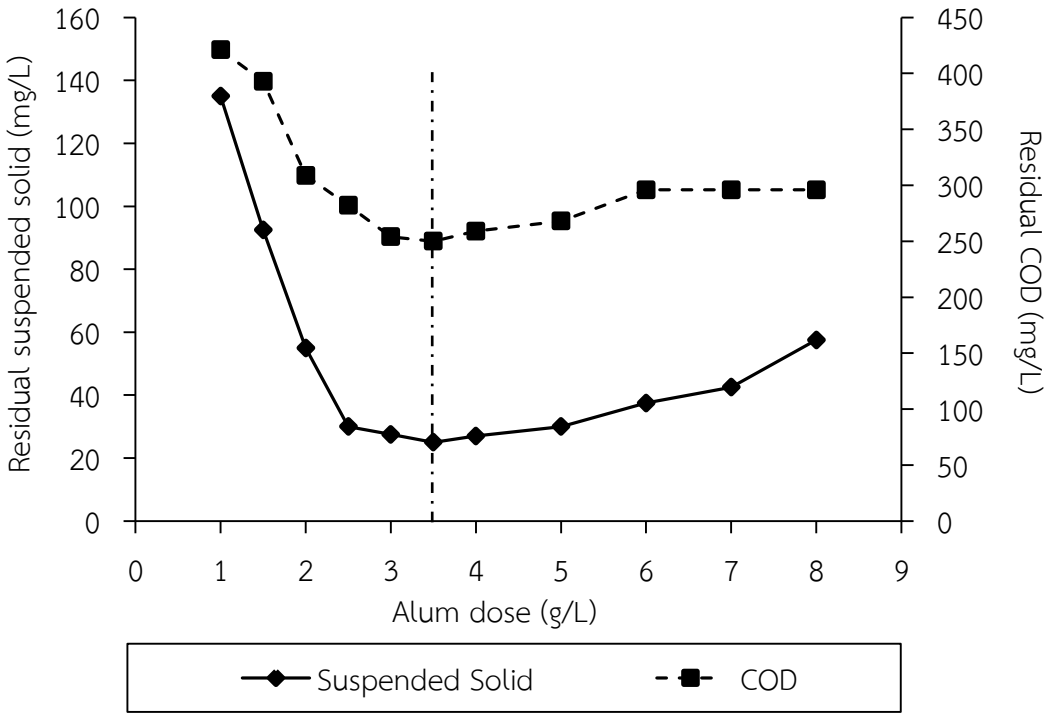
แต่การใช้สารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้นต่ำ โดยควบคุมพีเอชที่เหมาะสมจะสามารถลดของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ได้บางส่วนเท่านั้น เนื่องจากสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้นต่ำจะเกิดเพียงกลไกการดูดซับและทำลายประจุของอนุภาค (Charge neutralization) (Duan and Gregory, 2003) จึงยังไม่สามารถที่จะบำบัดสี หรือสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำทิ้งได้ อีกทั้งค่าของแข็งแขวนลอย และซีโอดีที่หลงเหลือยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของกาญจนา ธนิกกุล (2553) บำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มคือ มีค่าพีเอชเป็นด่างมากอยู่ในช่วง 9.76 – 9.82 ค่าความขุ่น 179.67 – 249.00 NTU และค่าสี 71.26 – 146.59 SU เมื่อนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม พบว่าการใช้สารส้มความเข้มข้น 300 mg/L ควบคุมพีเอช 8 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 30 และสีน้อยกว่าร้อยละ 10 เนื่องจากเกิดเพียงกลไกการดูดซับและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ และงานวิจัยของ กัลยา ศรีสุวรรณ (2542) ที่อธิบายว่าการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีค่าพีเอชเป็นด่างมากนั้น การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มในปริมาณที่ไม่มากพอ จะไม่เหมาะสมในการทำให้เกิดตะกอน โดยในกระบวนการโคแอกกูเลชันหากมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนขึ้นอีกจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดต่ำลง เนื่องจากเกิดการ Restabilization คืออนุภาคคอลลอยด์ในน้ำมีเสถียรภาพกลับคืนมา (Hassan and Puteh, 2007; วีระนุช บุญรุ่ง, 2553) แต่หากเติมสารสร้างตะกอนจนมากเกินพอ จะทำให้เกิดกลไก sweep coagulation (Metcalf and Eddy, 2004; Duan and Gregory, 2003) เป็นกลไกที่สามารถกวาดอนุภาคคอลลอยด์และดูดซับสารอินทรีย์ให้ตกตะกอนได้เกือบทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ในการทดลองจึงทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่มีค่าความขุ่นต่ำ และความเป็นด่างสูง ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น



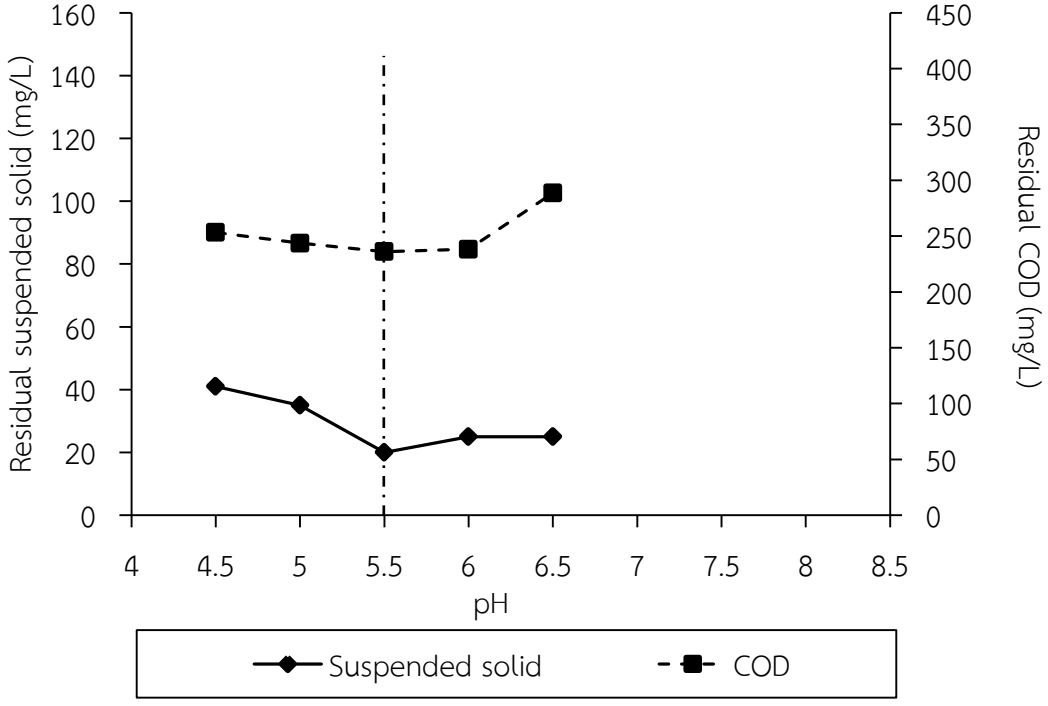
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของสารส้มและค่าพีเอชสำหรับการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชัน ดัดแปลงจาก Amirtharajah and Mill (1982)

ต่อมาจึงเป็นการทดลองโดยใช้สารสร้างตะกอนที่มีความเข้มข้นอยู่ช่วงที่ประมาณไว้จากค่าความเป็นด่างในน้ำทิ้ง ซึ่งในการทดลองที่ใช้สารส้มจะควบคุมพีเอชในช่วง 5.5 – 6.5 เช่นเดียวกับการทดลองแรก จากการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสารส้มให้มีค่าในช่วง 1 – 8 g/L พบว่าที่ความเข้มข้น 3.5 g/L จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดีได้ดี คือมีค่าร้อยละ 84.1 และ 72.6 ตามลำดับ ทำให้มีของแข็งแขวนลอยและซีโอดีหลงเหลืออยู่ 25 mg/L และ 250 mg/L ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ส่วนการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) จะควบคุมพีเอชประมาณ 6 - 7 จากการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นให้มีค่าอยู่ในช่วง 1 – 8 g/L พบว่าที่ความเข้มข้น 5 g/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีได้ดี คือมีค่าร้อยละ 88.9 และ 76.1 ตามลำดับ ทำให้มีของแข็งแขวนลอยและซีโอดีหลงเหลืออยู่ 21 mg/L และ 218 mg/L ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 หลังจากได้ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่ต้องการแล้ว จึงทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช จากการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L จะเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 4.5 – 6.5 พบว่าที่พีเอช 5.5 โดยเติม HCl 1 N ประมาณ 17 mL/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดีได้ดี คือมีค่าร้อยละ 89.5 และ74.1 ตามลำดับ ทำให้มีของแข็งแขวนลอยและซีโอดีหลงเหลืออยู่ 21 mg/L และ 236.06 mg/L ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L จะเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 5.5 – 8.5 พบว่าที่พีเอช 6.5 โดยเติม HCl 1 N ประมาณ 6 mL/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดีได้ดี คือมีค่าร้อยละ 90 และ 77 ตามลำดับ ทำให้มีของแข็งแขวนลอยและซีโอดีหลงเหลืออยู่ 20 mg/L และ 209.83 mg/L ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

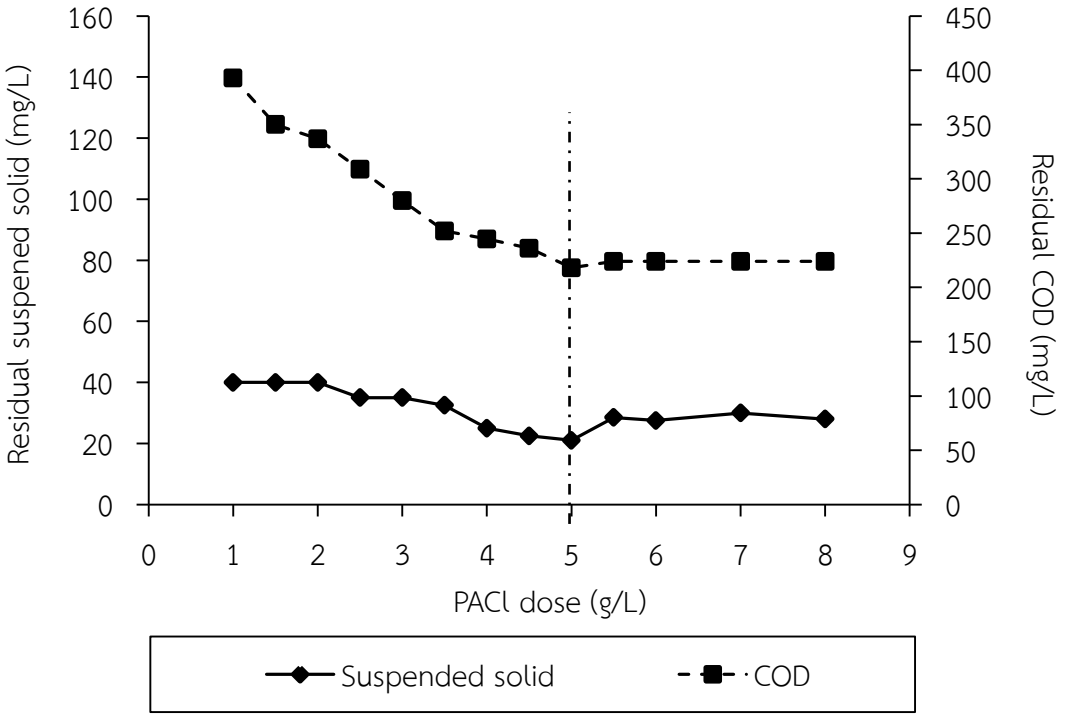
จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.12 เป็นการหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม เห็นได้ว่าในช่วงแรกเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสร้างตะกอนขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดีจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งที่เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มด้วยผลึก (Sweep coagulation) ขึ้น จะทำให้เกิดตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ มีลักษณะเหมือนวุ้นเหนียวๆ ในปริมาณมาก (Hassan and Puteh, 2007; วีระนุช บุญรุ่ง, 2553) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นอีก ประสิทธิภาพการบำบัดจะเริ่มคงที่ ต่างจากกลไกการดูดซับและทำลายประจุที่เมื่อเพิ่มสารสร้างตะกอนจะทำให้ประสิทธิภาพบำบัดลดลง (Metcalf and Eddy, 2004) ดังที่กล่าวไว้ในการทดลองแรก ส่วนในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.13 เป็นการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม จะพบว่าที่สภาวะเป็นกรด จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีมากนัก เนื่องจากสารสร้างตะกอนพึ่งจะแตกตัวเป็น Al^{3+} ที่มีสมบัติละลายน้ำ เพื่อไปทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ จึงไม่สามารถตกตะกอนได้ แต่เมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีสภาวะค่อนข้างเป็นกลาง จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ที่มีพื้นที่ผิวเพื่อไปสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำทิ้ง รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (floc) แล้วตกตะกอนสู่ด้านล่าง (Norulaini *et al*., 2001) จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น และเมื่อปรับพีเอชให้มีสภาวะเป็นด่าง จะเกิดเป็น $Al(OH)_4^-$ ที่อยู่ในรูปละลายน้ำ ไม่ตกตะกอน ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงมีค่าลดลงอีกครั้ง (Hassan and Puteh, 2007; Metcalf and Eddy, 2004; Duan and Gregory, 2003)



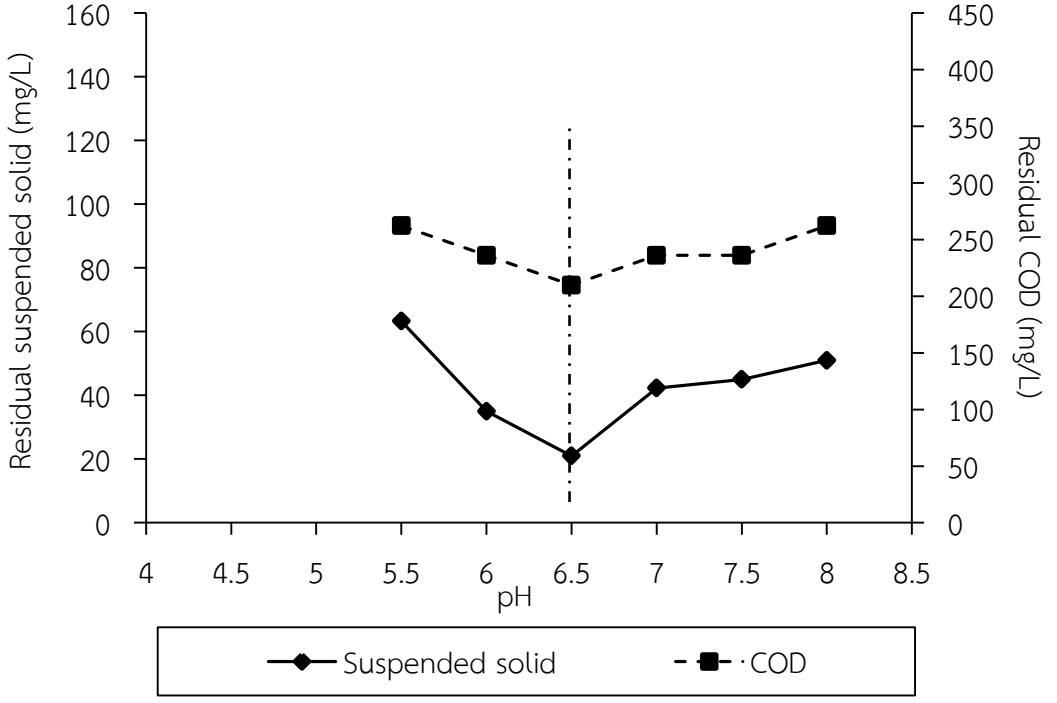
รูปที่ 4.10 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 5.5 – 6.5



รูปที่ 4.11 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ

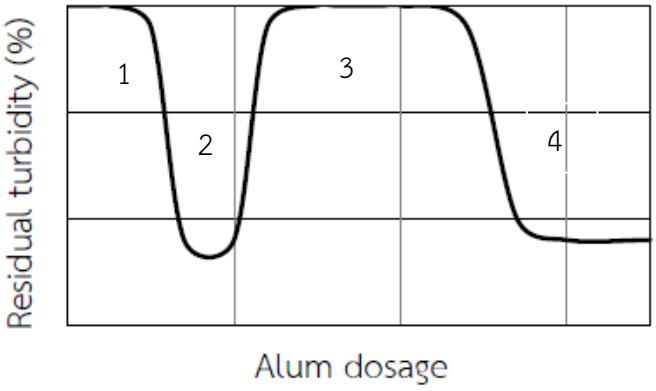


รูปที่ 4.12 ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมค่าพีเอช 6 - 7



รูปที่ 4.13 ค่าของแข็งแขวนลอยและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมค่าพีเอชในช่วงต่างๆ

จากผลการทดลองจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Ahmad *et al*. (2006) ที่ทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนจนถึงจุดจุดหนึ่งประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยจะดีที่สุด และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนขึ้นอีกประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่ ซึ่งความเข้มข้นที่มีประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด คือ สารส้มที่ความเข้มข้น 8 g/L และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6 g/L โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกลาง และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นอีกประสิทธิภาพการบำบัดก็จะลดลงเช่นกัน อีกทั้ง Metcalf and Eddy (2004) และ Duan and Gregory (2003) ได้อธิบายกลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารส้มกับร้อยละของความขุ่นที่หลงเหลืออยู่ โดยแบ่งออกเป็น 4 กลไก คือ กลไกที่ 1 เป็นการเติมสารสร้างตะกอนเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ กลไกที่ 2 เกิดการดูดซับและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอน กลไกที่ 3 เป็นการเติมสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคคอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง และกลไกที่ 4 เมื่อเติมสารสร้างตะกอนจนมากเกินพอ จะทำให้อนุภาคคอลลอยด์ถูกทำลายเสถียรภาพอีกครั้ง เรียกว่า Sweep coagulation ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากค่าความขุ่นมักแปรผันตามปริมาณของแข็งแขวนลอย จึงมีความสอดคล้องกับผลของปริมาณของแข็งแขวนลอยจากกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ทำการทดลองในช่วงความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนต่ำกว่าช่วงที่ประมาณไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะจัดได้ว่าเป็นกลไกที่ 2 ส่วนผลการทดลองในช่วงที่ใช้สารสร้างตะกอนความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่ประมาณไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะจัดเป็นกลไกในส่วนที่ 4 ซึ่งเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่สามารถอธิบายผลการทดลองที่รายงานไว้ข้างต้นได้



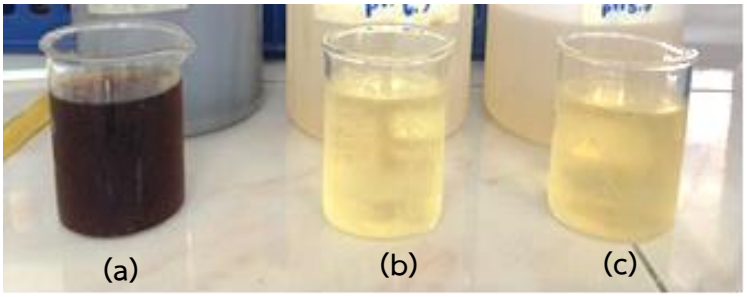
รูปที่ 4.14 ผลของการเติมสารสร้างตะกอนในการทำลายเสถียรภาพและตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์
ดัดแปลงจาก Metcalf and Eddy (2004)

ดังนั้นจุดที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้ดี คือ การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 ซึ่งโดยทั่วไปการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในกระบวนการโคแอกกูเลชันควรมีความเข้มข้นที่น้อยกว่าสารส้ม เนื่องจากโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่สามารถรวมอนุภาคและตกตะกอนได้ดีกว่า แต่ ในการทดลองหาความเข้มข้นของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในช่วง 1 – 8 g/L จะพบประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยที่ใกล้เคียงกัน ผู้ทดลองจึงเลือกจุดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือที่ความเข้มข้น 5 g/L ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แตกต่างกับการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 1 – 8 g/L ที่จะเห็นประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยที่ดีที่สุดได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จึงทำให้ในการทดลองมีการใช้ความเข้มข้นของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มากกว่าสารส้ม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ วีระนุช บุญรุ่ง (2553) ที่ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ที่มีลักษณะสมบัติ คือ ค่าพีเอชสูงประมาณ 12 และของแข็งแขวนลอย 200 – 250 mg/L เมื่อบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าจะต้องใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 2.56 g/L ที่พีเอช 7.2 ส่วนโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะใช้ที่ความเข้มข้น 4 g/L พีเอช 7.4 ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าสารส้มเช่นกัน และ O'Melia *et al*. (1989) ได้กล่าวว่าในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะมีการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าการใช้สารส้ม เมื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นสูง อุณหภูมิต่ำ และค่าพีเอชมีความเป็นกรด แต่เนื่องจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าพีเอชเป็นด่าง และมีความขุ่นต่ำจึงอาจทำให้มีการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสูงกว่า

4.2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดี ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้น จะได้สภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 ซึ่งอยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม คือ 5 – 7 (Metcalf & Eddy, 2004; Gilbert *et al*., 1976) ส่วนโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ใช้ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 ซึ่งอยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 5 – 8 เช่นกัน และนอกจากประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย และซีโอดีแล้ว ยังได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.16 เห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิดในกลไก sweep coagulation มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากสามารถบำบัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอยได้แล้ว ยังสามารถบำบัดกลุ่มสารอินทรีย์ที่วิเคราะห์ในรูปของ UV_{254} ซีโอดี และทีโอซี ได้มากกว่าร้อยละ 70 และบำบัดสีได้มากกว่าร้อยละ 80 อีกด้วย โดยน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันจะมีสีเหลืองอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากในการทดลองเป็นกลไก sweep coagulation ที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ทำให้กลุ่มสารอินทรีย์ถูกกำจัดได้ใน 2 ขั้นตอน คือ 1) การทำลายเสถียรภาพประจุให้เป็นกลางและทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จนสามารถรวมตัวกันเป็นฟล็อคขนาดใหญ่ขึ้น และตกตะกอนเป็น metal – humic complex 2) การดูดซับของสารอินทรีย์ที่มีประจุเป็นลบ บนผิวของโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุเป็นบวก จะเกิดขึ้นในช่วงที่พีเอชเป็นกลาง โดยสารส้มจะบำบัดสารอินทรีย์ใน

รูป UV_{254} และทีโอซีได้ดี ในช่วงพีเอชประมาณ 5 – 5.5 ส่วนโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีที่พีเอชเป็นกลาง (Duan and Gregory, 2003; Pernitsky, 2015) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ควรควบคุมพีเอชของการใช้สารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ 5.5 และ 6.5 ตามลำดับ จึงทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมีสารอินทรีย์ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤษดา ทองนาค (2553) ที่ทำการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าที่พีเอชเป็นกลางจะสามารถบำบัดดีโอซีได้ดี ซึ่งได้อธิบายไว้ว่าในช่วงนี้จะเกิดกลไกการสะเทินประจุที่ผิวคอลลอยด์ ดูดซับบนผิวคอลลอยด์ และ sweep coagulation ทำให้ตะกอนแยกจากน้ำได้ดี จึงเป็นพีเอชที่เหมาะแก่การบำบัดสารอินทรีย์

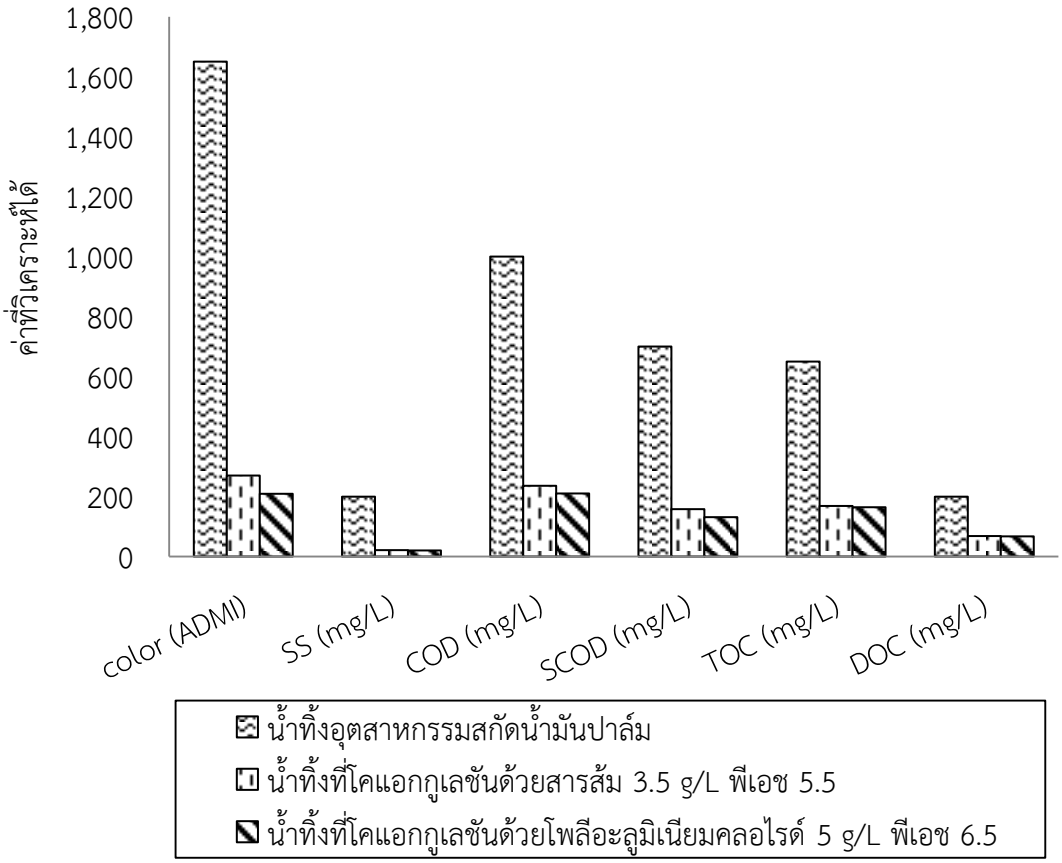


รูปที่ 4.15 สีของ (a) น้ำทิ้ง (b) น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (c) น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

และเมื่อคำนวณหาค่า SUVA พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิดมีค่า SUVA อยู่ในช่วง 2 – 4 L/mg-m ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แสดงถึงการพบสารอินทรีย์กลุ่ม humic และสารอินทรีย์อื่นๆ ที่มีสมบัติชอบน้ำหรือละลายน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำหรือไม่ละลายน้ำ (hydrophobic) ปะปนกันอยู่ (Edzwald and Benschoten, 1990) ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการโคแอกกูเลชันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์พวกไม่ชอบน้ำได้มากกว่าพวกชอบน้ำ พวกที่มีประจุมากกว่าพวกที่เป็นกลาง และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (Carroll *et al*., 2000) ดังนั้นน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงควรมีสารอินทรีย์กลุ่ม humic ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำหลงเหลืออยู่น้อยกว่าน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการโคแอกกูเลชัน ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.2 ที่พบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำได้สูงกว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	น้ำทิ้ง	สารส้ม ความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5		โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5	
		ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย	ร้อยละของการบำบัด	ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย	ร้อยละของการบำบัด
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	3.1	97.3	3.05	97.4
ความเป็นด่าง (mg/L as $CaCO_3$)	2,500 – 4,000	440	-	670	-
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 - 8	7.032	-	7.078	-
UV_{254} (cm^{-1})	10 - 12	2.27	77.5	2.24	77.8
สี (Pt-Co)	550 – 600	22.91	96.0	20.36	96.4
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	270	83.5	209	87.3
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)	170 – 250	21	89.5	20	90
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/L)	5,000 – 5,500	4,613	16.1	4,536	17.2
ซีโอดีทั้งหมด (mg/L)	900 – 1,300	236.06	74.1	209.83	77.0
ซีโอดีละลายน้ำ (mg/L)	600 – 800	157.37	76.6	131.14	80.5
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	168.5	74.1	163.8	74.8
ดีโอซี (mg/L)	180 – 220	68.52	63.9	67.46	64.5
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	3.31	-	3.32	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (µm)	21 - 22	3.4	-	3.1	-
อะลูมิเนียม (mg/L)	-	2.37	-	0.2	-

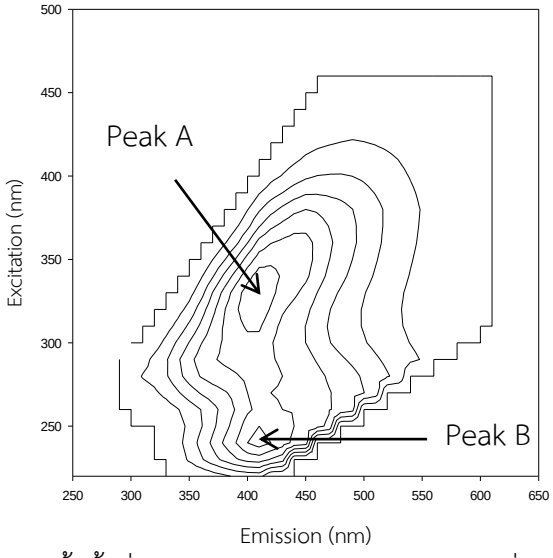


รูปที่ 4.16 แผนภูมิเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน

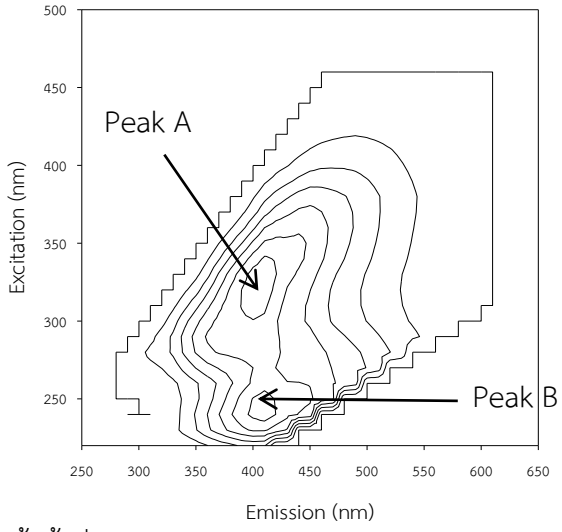
4.2.3 กลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

จากรูปที่ 4.15 เห็นได้ว่าสีในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีสีเปลี่ยนไปจากเดิม คือจากเดิมน้ำทิ้งมีสีน้ำตาลเข้ม จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสี ที่มีค่าลดลง รวมทั้งพารามิเตอร์ อื่นๆ เช่น ซีโอดี ทีโอซี ดีโอซี UV_{254} SUVA ที่ลดลงด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงถึงการลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ วีระนุช บุญรุ่ง (2553) ที่พบว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจะกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ และส่งผลทำให้สีมีค่าลดลง อีกทั้งในน้ำทิ้งมีค่า SUVA ที่มากกว่า 4 L/mg-m หากนำมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติและดีโอซีได้ดี (Edzwald and Tobiason, 1999) เมื่อพบว่ามีการลดลงของสารอินทรีย์ จึงทำการวิเคราะห์กลุ่มสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยเทคนิค FEEM พบว่าการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 และการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 นั้น จะปรากฏพีคในตำแหน่งเดียวกัน คือ ตำแหน่ง A มีค่า Ex_{max} / Em_{max} = 330 nm / 410 nm และตำแหน่ง B มีค่า Ex_{max} / Em_{max} = 240 nm / 410 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายได้ว่า ที่ตำแหน่ง A มีค่า excitation wavelengths มากกว่า 280 nm และมีค่า

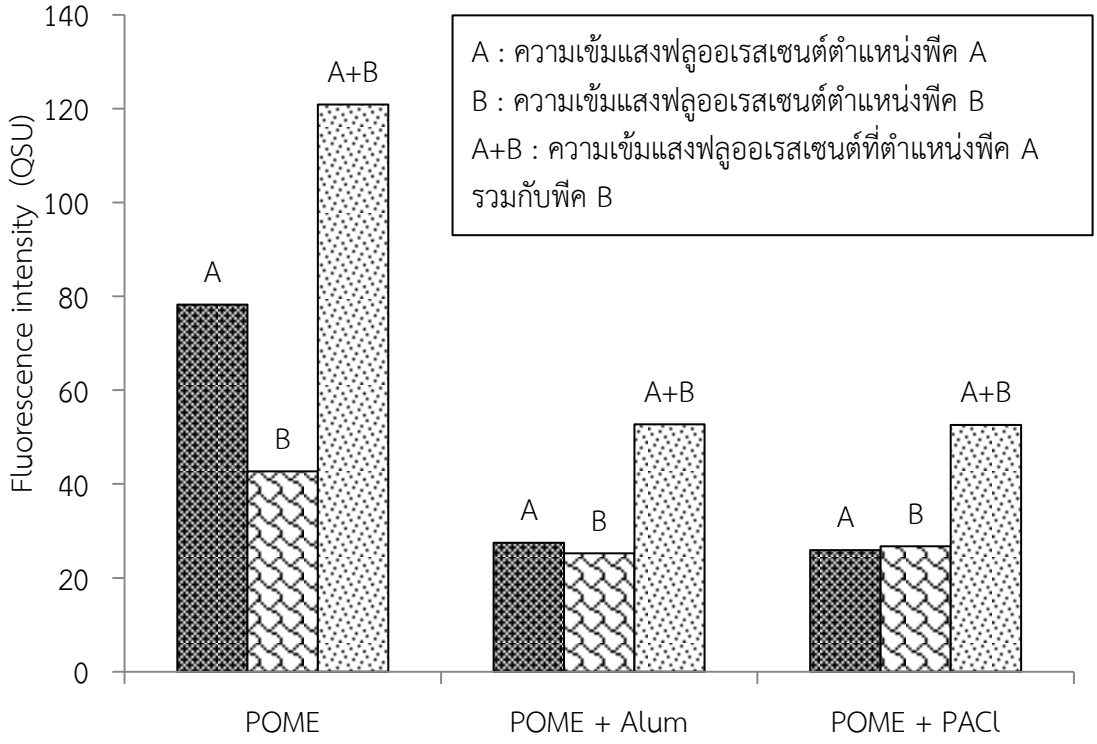
emission wavelengths มากกว่า 380 nm จัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท humic acid – like ส่วนที่ตำแหน่ง B มีค่า excitation wavelengths น้อยกว่า 250 nm และมีค่า emission wavelengths มากกว่า 380 nm จัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท fulvic acid – like ส่วนค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่า การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 จะมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ที่พีค A และ B เท่ากับ 27.5 และ 25.2 QSU ตามลำดับ ส่วนการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 จะมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ที่พีค A และ B เท่ากับ 25.9 และ 26.7 QSU ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 การจำแนกน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 โดยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM)



รูปที่ 4.18 การจำแนกน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/Lควบคุมพีเอช 6.5 โดยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM)



รูปที่ 4.19 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ในน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

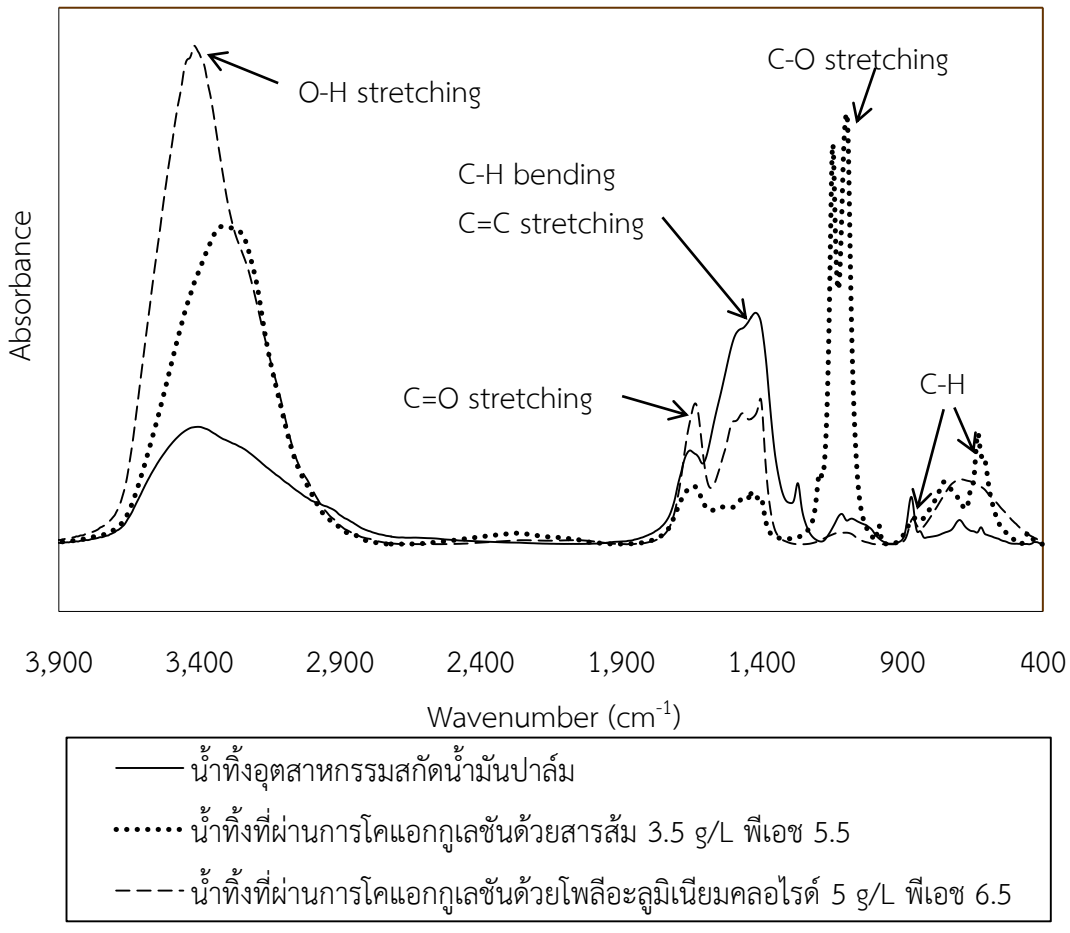
จากผลการวิเคราะห์ FEEM ของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ตรวจพบพีค 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่ง A Ex_{max} / Em_{max} = 360 nm / 450 nm มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ 78.2 QSU และตำแหน่ง B Ex_{max} / Em_{max} = 290 nm / 450 nm มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ 42.7 QSU ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ที่จัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท humic acid – like ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ FEEM ของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันในข้างต้นนั้น เห็นได้ว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถที่จะกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท Humic acid – like ที่ประกอบพวกหมู่ฟังก์ชันอะโรมาติกได้เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมีสารอินทรีย์ละลายน้ำลดลง สอดคล้องกับค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์รวม (A+B) ของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม 3.5 g/L พีเอช 5.5 และน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L พีเอช 6.5 มีค่าลดลงร้อยละ 56.4 และ 56.5 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 อีกทั้งสอดคล้องกับค่าดีโอซี สี และSUVA ที่มีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันจึงปรากฏเป็นสีเหลืองอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท humic acid ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลถึงดำในบางส่วนได้ถูกกำจัดออกไป จึงปรากฏ

เป็นสีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก fulvic acid (Stevenson, 1982) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน aromatic น้อยกว่า humic acid แต่จะพบหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ของพวกคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมากกว่า (Pettit, 2004; Shin *et al*., 1999)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM พบว่าในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันจะหลงเหลือสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมู่ฟังก์ชันที่เป็น aliphatic และ aromatic จึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อเปรียบเทียบพีคที่ตำแหน่งความถี่ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ระหว่างน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยได้ควบคุมปริมาณตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มีปริมาณเท่ากัน พบว่าน้ำทิ้งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ของพวก aromatic hydroxyl group ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ของพวก carboxyl ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ C=C stretching ความถี่ 1,272, 1,116 และ 1,080 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำทิ้ง และเมื่อนำน้ำทิ้งมาบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 จะปรากฏพีคต่ำกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 1,642 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching และความถี่ 1,431 cm^{-1} ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ C=C stretching ส่วนน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 จะปรากฏพีคต่ำกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 1,642 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,450 cm^{-1} ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ C=C stretching และความถี่ 1,100 cm^{-1} ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid จำพวกหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H และ C=O stretching ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในโครงสร้างของรงควัตถุที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เช่น แคโรทีนนอยด์ ฟลาโวนอยด์ และลิกนิน (สุจิตรา(เลิศพฤกษ์)รตนะมโน, 2555; Alriols, 2009) จึงทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันไม่ปรากฏสีน้ำตาล สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าสี ทีโอซี ดีโอซี และความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์จากการวิเคราะห์ FEEM ที่มีค่าลดลงด้วย

ซึ่งนอกจากการปรากฏพีคที่ต่ำลงในตำแหน่งความถี่ต่างๆแล้ว ยังพบตำแหน่งที่ปรากฏพีคสูงกว่าในน้ำทิ้งอีกด้วย คือ ในการบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม 3.5 g/L พีเอช 5.5 นั้น จะปรากฏพีคที่สูงกว่าน้ำทิ้งในบริเวณตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ความถี่ 1,100 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching และความถี่ 600 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H จึงนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มด้วยเทคนิค FTIR จากงานวิจัยของ Contreras *et al*. (2006) จะปรากฏพีคสูงที่ตำแหน่งความถี่ 3,000 – 3,700, 1,655, 1,135, 998 และ 613 cm^{-1} งานวิจัยของ Wang *et al*. (2013) และ Mclnture *et al*. (1981) จะปรากฏพีคสูงที่ตำแหน่งความถี่ 3,435 ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน Al–OH–Al stretching ความถี่ 1,645 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H bending ความถี่ 1,125 และ 982 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันของ Al–OH และความถี่ 610 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันของ Al–O ซึ่งเห็นได้ว่าจะปรากฏพีคสูงในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของพีคที่สูงขึ้นในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยสารส้มจึงอาจ

กล่าวได้ตำแหน่งที่ปรากฏพีคสูงกว่าในน้ำทิ้งนั้นเกิดจากการหลงเหลือของสารส้มที่เติมลงไป เช่นเดียวกับการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L พีเอช 6.5 ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ปรากฏพีคสูงกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ความถี่ 1,642 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching และที่ความถี่ 700 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Mclnture *et al*. (1981) ที่วิเคราะห์ FTIR ของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าจะปรากฏพีคสูงที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันคือความถี่ 3,550 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน Al–OH–Al stretching ความถี่ 1,650 และ 2,125 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H bending ของน้ำ และความถี่ 800 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน Al–O–H หรือ Al–OH–Al จึงอาจเกิดจากการหลงเหลือของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เติมลงไปเช่นกัน สอดคล้องกับพบอะลูมิเนียมหลงเหลือในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน อีกทั้งตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ FTIR นั้นเป็นตัวอย่างที่ผ่านการ freeze dry ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์อาจเกิดการสัมผัสกับอากาศและความชื้น ทำให้ที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} ปรากฏพีคที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าว เป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่สามารถพบได้ในองค์ประกอบน้ำ (Baharuddin *et al*., 2011)



รูปที่ 4.20 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถที่จะบำบัดของแข็งแขวนลอย กลุ่มสารอินทรีย์ทั้งละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้ ซึ่งนอกจากสารอินทรีย์แล้ว พบว่ายังสามารถบำบัดกลุ่มสารอนินทรีย์ได้อีกด้วย เช่น พวกไอออนที่ทำให้เกิดความเป็นด่างในน้ำทิ้งได้ เนื่องจากการใช้สารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีสภาพความเป็นด่างลดลงเหลือ 440 และ 670 mg/L as $CaCO_3$ ตามลำดับ แต่ในการทดลองได้เติมสารสร้างตะกอนจนมากเกินพอ ทำให้มีการหลงเหลืออะลูมิเนียมในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน คือ การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 จะพบอะลูมิเนียมหลงเหลืออยู่ 2.3 mg/L ซึ่งมากกว่าการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 ที่พบอะลูมิเนียมหลงเหลือเพียง 0.2 mg/L

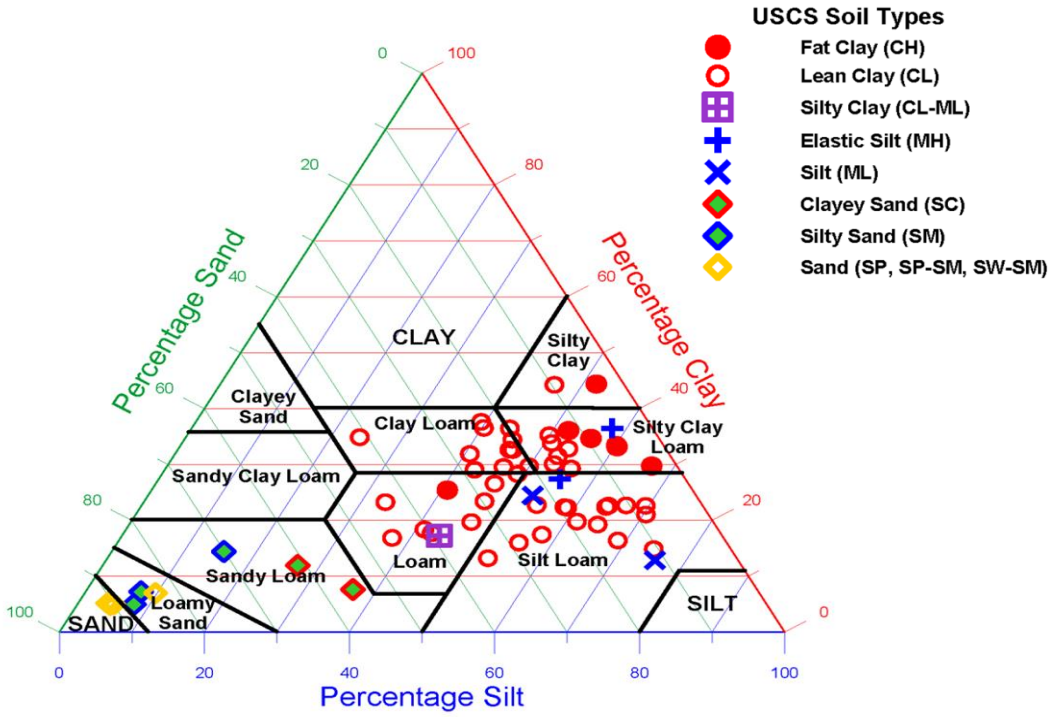
4.3 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดิน

จากลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่เหมาะสมในการปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โรงงานส่วนใหญ่จึงนิยมนำไปรดในสวนปาล์ม ซึ่งจากการสังเกตแหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียงสวนปาล์มพบว่ามีลักษณะใส และมีน้ำอยู่ตลอดเวลาแม้ในฤดูร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.21 งานวิจัยนี้จึงสนใจการใช้ดินในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม โดยในการทดลองจะใช้ดินที่บรรจุคอลัมน์มาทำการเติมน้ำทิ้ง และน้ำกลั่นด้วยอัตรา 1 และ 3 cm/week เป็นระยะเวลา 14 week เพื่อศึกษากลไกการบำบัดประสิทธิภาพในการบำบัดพิจารณาจากลักษณะสมบัติเบื้องต้น กลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำทิ้งระหว่างการบำบัดโดยดินและกระบวนการโคแอกกูเลชัน อีกทั้งแนวทางการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินไปประยุกต์ใช้หรือการนำไปบำบัดต่อ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่าการบำบัดโดยดินสามารถบำบัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย และสี ได้ด้วยกลไกการกรอง การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และการดูดซับ เช่นงานวิจัยของ Yang *et al*. (2010) ใช้ดินที่บรรจุในคอลัมน์มาบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ด้วยอัตรา 17 mm/d เป็นเวลา 8 week สามารถบำบัดบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ อีกทั้งเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินไปรดแปลงหญ้าจะไม่ส่งผลกระทบต่อการเติบโตของหญ้า งานวิจัยของธิดารัตน์ บุญศรี (2543) ใช้ดินเป็นสารดูดติดผิวในน้ำชะขยะ พบว่าในการทดลองแบบกะ ดินทรายแป้งปนดินเหนียวสามารถบำบัดสีและซีโอดีได้ดีกว่าดินร่วน และดินร่วนเหนียว แต่จะไม่เหมาะสำหรับการทดลองแบบต่อเนื่อง เพราะมีความสามารถในการซึมของน้ำต่ำ งานวิจัยของGonzaflez-Vila *et al*. (1995) ใช้ดินความลึก 1 m บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันมะกอก พบว่าในดินที่ความลึก 0- 50 cm จะมีการสะสมของไขมันและสารอินทรีย์สูงกว่าความลึก 50 – 100 cm ทำให้น้ำออกมีลักษณะสมบัติที่ดีขึ้น ดังนั้นการบำบัดโดยดิน อาจมีความเหมาะสมที่จะนำบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มได้ แต่หากใช้การบำบัดโดยดินเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดปัญหาของการอุดตันขึ้น (Christen *et al*., 2010) จึงควรหาอัตราการรด ระยะเวลา และพื้นที่ที่ใช้ในการบำบัดให้เหมาะสม

รูปที่ 4.21 แหล่งน้ำใกล้เคียงบริเวณสวนปาล์ม

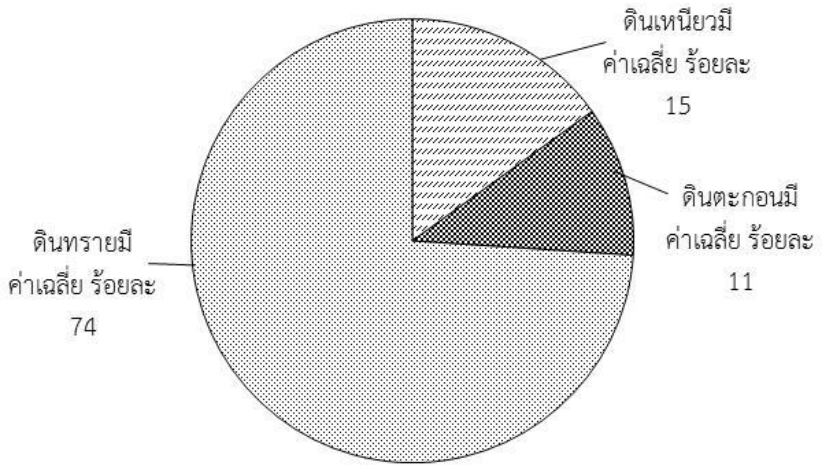
4.3.1 ประเภทของดิน

การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดิน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอย่างดินในสวนปาล์มบริเวณโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งเดียวกับที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง โดยจะทำการเก็บดินทุกๆความลึก 20 cm ตลอดชั้นความลึก 1 m และนำมาจำแนกประเภทตามขนาดเม็ดดินด้วยแผนภูมิสามเหลี่ยม (Triangular Soil Classification Chart) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นวิธีการจำแนกที่ง่าย เหมาะกับงานเกษตรกรรม และจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification system (USCS) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เหมาะกับงานวิศวกรรมทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.10



รูปที่ 4.22 แผนภูมิสามเหลี่ยม (Triangular Soil Classification Chart)
เทียบกับการจำแนกประเภทดินตามระบบ USCS
ที่มา : Ohio EPA (2015)

จากการจำแนกตัวอย่างดินในแต่ละชั้นความลึกตามขนาดเม็ดดิน ด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) จะแบ่งได้ดินได้เป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ประกอบไปด้วยดินทรายที่มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด คือ ร้อยละ 74 ซึ่งเป็นดินที่มีความสามารถอุ้มน้ำต่ำ ระบายน้ำได้ดี มีเนื้อที่ผิวสัมผัสน้อยทำให้ดูดซับสารต่างๆได้น้อย รองลงมาคือดินเหนียวมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 15 เป็นดินที่มีความสามารถอุ้มน้ำได้มาก การระบายน้ำไม่ดี มีเนื้อที่ผิวมากสามารถดูดซับสารต่างๆได้ดี และสุดท้ายคือดินตะกอนมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 11 จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงทราย แต่จะอุ้มน้ำได้ดีกว่า (ยงยุทธ และคณะ, 2541) ซึ่งเมื่อนำมาแบ่งประเภทดินด้วยแผนภูมิสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าตัวอย่างดินตลอดชั้นความลึก 1 m จัดเป็นกลุ่มดินร่วนปนทราย (sandy loam, SL) ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบของดินร่วนปนทรายที่จะต้องประกอบด้วยทรายร้อยละ 50 – 80 ดินตะกอนร้อยละ 0 – 50 และดินเหนียวร้อยละ 0 – 20 (สราวุธ, 2545; ยงยุทธ และคณะ, 2541)

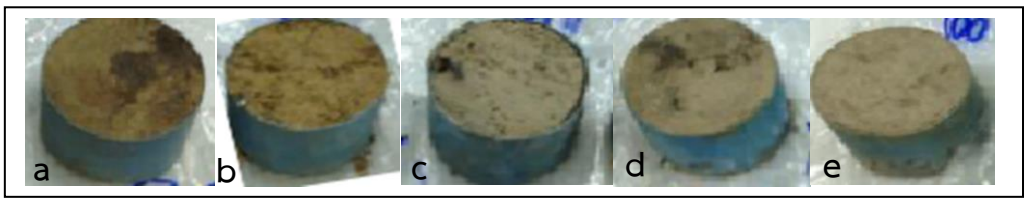


รูปที่ 4.23 ค่าเฉลี่ยการจำแนกดินในสวนปาล์มตามขนาดเม็ดดิน

หลังจากนั้นได้นำดินมาจำแนกประเภทด้วยระบบ Unified Soil Classification system (USCS) โดยนำตัวอย่างดินในแต่ละชั้นความลึกมาร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 เพื่อคำนวณหาร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าดัชนีความเหนียว (P.I.) และพิกัดความเหลว (L.L.) ดังแสดงในตารางที่ ค. 2 - ตารางที่ ค. 6 แล้วจึงนำไปจำแนกประเภทของดินด้วยระบบ USCS ดังแสดงในตารางที่ 2.10 พบว่า ตัวอย่างดินทุกๆ 20 cm ตลอดชั้นความลึก 1 m จัดเป็นดินกลุ่ม Silty sands (SM) คือ ทรายปนตะกอนทราย สอดคล้องกับผลการจำแนกดินด้วยแผนภูมิสามเหลี่ยมที่พบว่าดินในสวนปาล์มจัดเป็นกลุ่มดินร่วนปนทราย (sandy loam, SL) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22 เห็นได้ว่าในกลุ่มดินร่วนปนทราย จะประกอบด้วยดินกลุ่ม silty sand (SM) และ clayey sand (SC) ที่ได้จากการจำแนกด้วยระบบ USCS นั่นเอง ดังนั้น ดินในสวนปาล์มทุกๆความลึก 20 cm ตลอดชั้นความลึก 1 m จัดเป็นดินกลุ่มทรายปนตะกอนทราย (silty sand, SM) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มดินร่วนปนทราย (sandy loam, SL) (Ohio EPA, 2015)

เมื่อทราบประเภทของดินแล้ว ต่อมาเป็นคุณสมบัติของดินตลอดชั้นความลึก 1 m พบว่าดินในช่วงความลึก 0 – 40 cm จากชั้นผิวดิน มีสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (a, b) ซึ่งสี

น้ำตาลของดินนี้เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมกันทำให้มีอินทรียวัตถุสูง จัดเป็นประเภทชั้นดินอินทรีย์ (O horizon) และชั้นดินบน (A horizon) ส่วนดินที่ความลึก 40 – 100 cm มีน้ำตาลเทา ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (c, d, e) ซึ่งสีเทาของดินจะเกิดจากพวกดินทราย และดินเหนียว ที่มีอินทรียวัตถุน้อยกว่าชั้นดิน O และ A เรียกว่าชั้นดินล่าง (B horizon) และชั้นชะล้าง (E horizon) (ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ, 2541; กรมพัฒนาที่ดิน, 2556) ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าอินทรียวัตถุในดินที่พบว่าดินที่ความลึก 0 – 40 cm จะมีค่าสูงกว่าดินที่ความลึก 40 – 100 คือดินที่ความลึก 0 – 40 cm มีค่าอินทรียวัตถุอยู่ในระดับปานกลาง คือร้อยละ 1.5 – 2.5 ส่วนดินที่ความลึก 40 – 100 cm จะมีค่าอินทรียวัตถุในระดับต่ำปานกลางถึงต่ำคือ ร้อยละ 0.5 – 1.5 (บทความเกษตรวาฬน้ำเงิน, 2557) ส่วนค่าพีเอชของดินตลอดชั้นความลึก 1 m อยู่ในช่วง 7.8 – 8.3 จัดเป็นดินที่มีความเป็นด่างอ่อน ซึ่งอาจเกิดจากเกลือบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น (Davis, 2015) ค่าความหนาแน่นของดินอยู่ในช่วง 2 – 2.2 g/cm^3 มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นดินโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 16 – 23 มีค่าความพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 37 – 40 นอกจากนี้ Swiss Standard SN 670 010b (1999); Das (2008) และ สราวุธ จริตงาม (2545) ได้อธิบายสมบัติของกลุ่มดินทรายปนตะกอนทรายไว้คือ 1) น้ำซึมผ่านได้ปานกลางถึงยาก 2) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึม (Hydraulic conductivity, k) อยู่ในช่วง 1 x 10^{-8} – 5 x 10^{-6} m/s 3) มีค่าความพรุนร้อยละ 25 – 49 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิเคราะห์ 4) อัตราส่วนช่องว่าง 0.33 – 0.98 5) มีการยุบตัวน้อยเมื่อบดอัดแน่น



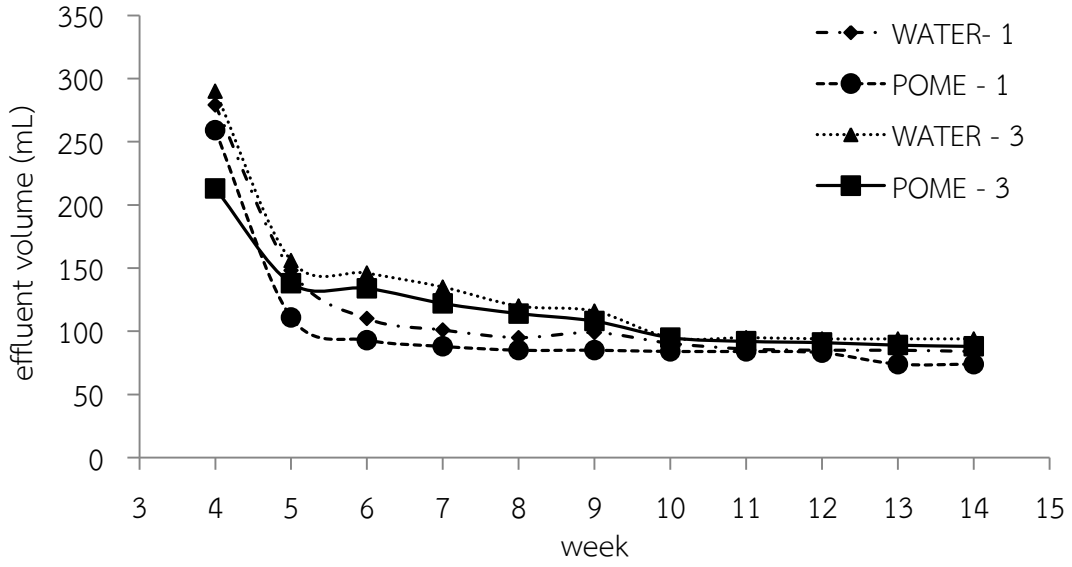
รูปที่ 4.24 ตัวอย่างดินในสวนปาล์มที่ทำการเจาะเก็บที่ความลึกต่างๆดังนี้
(a) 0 - 20 cm (b) 20 – 40 cm (c) 40 – 60 cm (d) 60 – 80 cm (e) 80 – 100 cm

4.3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในคอลัมน์

จากที่โรงงานส่วนใหญ่ปล่อยน้ำทิ้งรดในสวนปาล์ม ประกอบกับมีงานวิจัยอื่นๆที่ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยดิน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์พีวีซีแบบเปิดด้านบน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 cm สูง 100 cm บรรจุดินในสวนปาล์มให้มีความสูง 75 cm มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2 – 2.2 g/cm^3 ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 16 – 23 ทำการทดลองในที่ร่ม ไม่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำฝน และไม่มีการปลูกพืช พร้อมทั้งทำการเติมน้ำกลั่นและน้ำทิ้งทุกวัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยดิน โดยเลือกใช้การเติมน้ำระบบอัตราการไหลช้า (slow rate) คืออัตรา 1 cm/week หรือ 1.6x10^{-8} m/s (เติมน้ำ 72 mL/d) และอัตรา 3 cm/week หรือ 5x10^{-8} m/s (เติมน้ำ 217 mL/d) ซึ่งมีการทดลองจำนวน 4 คอลัมน์ ดังนี้

- คอลัมน์ที่ 1 เติมน้ำกลั่นทุกวันด้วยอัตรา 1 cm/week แทนด้วยสัญลักษณะ WATER- 1
- คอลัมน์ที่ 2 เติมน้ำทิ้งทุกวันด้วยอัตรา 1 cm/week แทนด้วยสัญลักษณะ POME - 1
- คอลัมน์ที่ 3 เติมน้ำกลั่นทุกวันด้วยอัตรา 3 cm/week แทนด้วยสัญลักษณะ WATER- 3
- คอลัมน์ที่ 4 เติมน้ำทิ้งทุกวันด้วยอัตรา 3 cm/week แทนด้วยสัญลักษณะ POME - 3

หลังจากทำการเติมน้ำลงคอลัมน์แล้ว จะเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินมาทำการวิเคราะห์ทุกสัปดาห์ๆ ละครั้ง พบว่า ในช่วงแรกที่ทำการเติมน้ำกลั่นและน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ จะไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์หรือมีปริมาณน้อยมากในแต่ละสัปดาห์ จนในสัปดาห์ที่ 4 จะมีน้ำไหลออกจากทุกคอลัมน์ เนื่องจากในช่วงแรกดินที่บรรจุในคอลัมน์จะดูดซับน้ำที่ทำการเติมน้ำลงไป แต่เมื่อน้ำที่เติมลงไปมากขึ้น น้ำจึงสามารถไหลซึมออกมา ซึ่งในคอลัมน์ WATER – 1 และ POME – 1 น้ำที่เติมจะสามารถไหลซึมลงดินได้ทั้งหมด แต่ในคอลัมน์ WATER – 3 และ POME – 3 น้ำจะไม่สามารถซึมได้ทั้งหมด ทำให้มีบางส่วนที่เอ่อออยู่ด้านบนผิวดิน ซึ่งจากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่า ในสัปดาห์ที่ 4 WATER – 3 จะมีปริมาณน้ำที่ไหลออกสูงสุด รองลงมาคือ WATER – 1, POME – 1 และ POME – 3 ตามลำดับ เนื่องจาก WATER – 1 และ WATER – 3 เป็นคอลัมน์ที่เติมด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากสิ่งปนเปื้อน WATER – 3 เติมในอัตราที่มากกว่าจึงไหลออกมาปริมาณสูงกว่า ส่วนคอลัมน์ POME – 1 และ POME -3 เติมด้วยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนทั้งของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทำให้เกิดการอุดตันทั้งบนผิวดินและช่องว่างในดิน ซึ่ง POME – 1 จะเติมน้ำทิ้งในอัตราที่ต่ำกว่าทำให้สามารถซึมลงดินได้ทั้งหมด จึงมีปริมาณน้ำไหลออกมากกว่า POME – 3 ที่เติมด้วยอัตราที่สูงกว่า 3 เท่า จึงมีปริมาณของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนสูงกว่าด้วย น้ำทิ้งจึงไม่สามารถซึมลงดินได้ ทำให้เอ่อออยู่ด้านบน ดินในคอลัมน์ก็จะแน่นขึ้น น้ำที่สามารถไหลผ่านดินจึงน้อยที่สุด



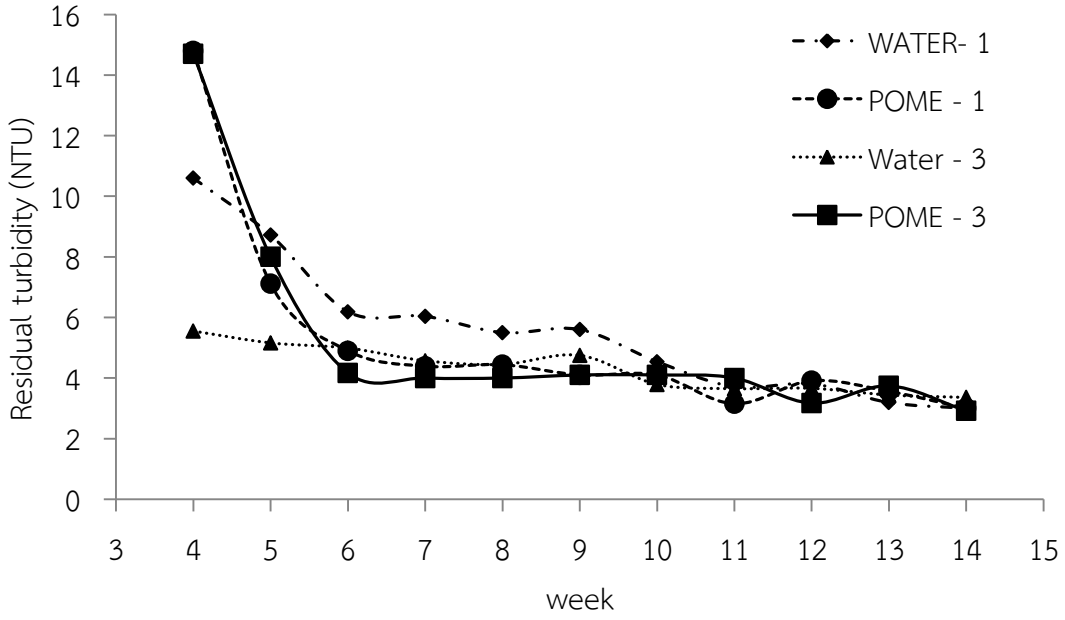
รูปที่ 4.25 ปริมาณน้ำไหลออกจากการบำบัดโดยดินในแต่ละสัปดาห์

ต่อมาในช่วงสัปดาห์ที่ 5 – 14 เห็นได้ว่าทั้งสี่คอลัมน์จะมีน้ำไหลออกจากคอลัมน์ลดลงเรื่อยจนเริ่มคงที่ สอดคล้องกับค่าความสามารถในการแทรกซึมของดิน (infiltration capacity) ที่เมื่อให้ระยะเวลาในการซึมมากขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านจะลดลงจนมีค่าคงที่ (steady infiltration rate) (ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ, 2541; Rice, 1974) แต่ในช่วงนี้คอลัมน์ POME – 3 จะมีปริมาณน้ำไหลออก มากกว่าคอลัมน์ WATER – 1 และ POME – 1 แตกต่างจากในสัปดาห์ที่ 4 ที่ POME – 3 จะมีปริมาณน้ำไหลออกน้อยที่สุด เนื่องมาจากเมื่อเติมน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ทุกๆวัน ปริมาณน้ำที่เอ่อด้านบนจะเพิ่มขึ้น จึงมีน้ำหนักที่จะขับเคลื่อนน้ำออกมามากขึ้น ซึ่งสามารถดูได้จากการยุบตัวของดิน ที่พบว่า POME – 3 จะมีการยุบตัว 5 cm ส่วน WATER – 3, WATER – 1 และ POME – 1จะมีการยุบตัว 3, 2 และ 2 cm ตามลำดับ ประกอบกับในคอลัมน์เป็นดินทรายปนตะกอนทราย น้ำจึงยังสามารถไหลซึมออกมาได้ โดยคอลัมน์ WATER – 1, POME – 1, WATER – 3 และ POME – 3 จะเติมน้ำลงไป 504, 1,519, 504 และ 1,519 mL/week ตามลำดับ ซึ่งตลอดระยะเวลา 14 สัปดาห์นี้ มีปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์ WATER – 1, POME – 1, WATER – 3 และ POME – 3 เฉลี่ยประมาณ 115, 102, 130 และ 117 mL/week ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีการเก็บกักน้ำอยู่ในชั้นดิน และบนผิวดิน รวมทั้งมีบางส่วนที่อาจระเหยไปในอากาศ และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดิน พบว่า คอลัมน์ WATER – 1, POME – 1, WATER – 3 และ POME – 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านประมาณ 3.75×10^{-9}, 3.3×10^{-9}, 4.2×10^{-9} และ 3.8×10^{-9} ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินทรายปนตะกอนทรายทั่วไปที่มีค่า $1 \times 10^{-8} – 5 \times 10^{-6}$ m/s (Swiss Standard SN 670 010b, 1999 และ Das, 2008) อาจเนื่องมาจากร้อยละขององค์ประกอบดิน ความหนาแน่นของดิน และลักษณะสมบัติของน้ำที่ไหลผ่านดินที่แตกต่างกัน

นอกจากทำการเก็บปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ในทุกสัปดาห์แล้ว ยังวิเคราะห์ลักษณะสมบัติอื่นๆ ดังนี้ ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินทั้ง 4 คอลัมน์ พบว่ามีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8 – 8.5 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพีเอชของดิน (7.8 – 8.3) ที่มีค่าค่อนไปทางเป็นด่างเล็กน้อย อาจเกิดจากพวกแร่ธาตุที่อยู่ในดิน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น (Davis, 2015) และมีค่าใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำทิ้ง (8.3 – 8.5) ที่มีค่าค่อนไปทางเป็นด่างเล็กน้อยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1และจากการตรวจพบพวก aromatic hydroxyl group ในน้ำทิ้งด้วยเทคนิค FTIR แสดงในเห็นว่าในน้ำทิ้งมีการปนเปื้อนของไอออนพวกคาร์บอเนต และไฮดรอกซิล จึงทำให้ค่าพีเอชค่อนไปทางเป็นด่าง ดังนั้นในคอลัมน์ POME – 1 และ POME – 3 เมื่อเติมน้ำทิ้งให้ไหลผ่านดิน จึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างน้ำทิ้งและดิน น้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์จึงมีพีเอชที่ใกล้เคียงกับในดินและน้ำทิ้ง ส่วนคอลัมน์ WATER – 1 และ WATER – 3 ค่าพีเอชของน้ำที่ไหลผ่านดินจะมีค่าพีเอชมากกว่าน้ำกลั่นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อน้ำกลั่นที่มีค่าพีเอช 5.5 – 6 ไหลผ่านดินจะแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนตในดิน ทำให้น้ำที่ไหลออกมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินทั้ง 4 คอลัมน์ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.5 – 4.5 mS/cm ซึ่งสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่น (2 – 3 µS/cm) และต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้ง (7 – 8 mS/cm) เนื่องจากในคอลัมน์ WATER - 1 และ WATER - 3 เมื่อเติมน้ำกลั่นให้

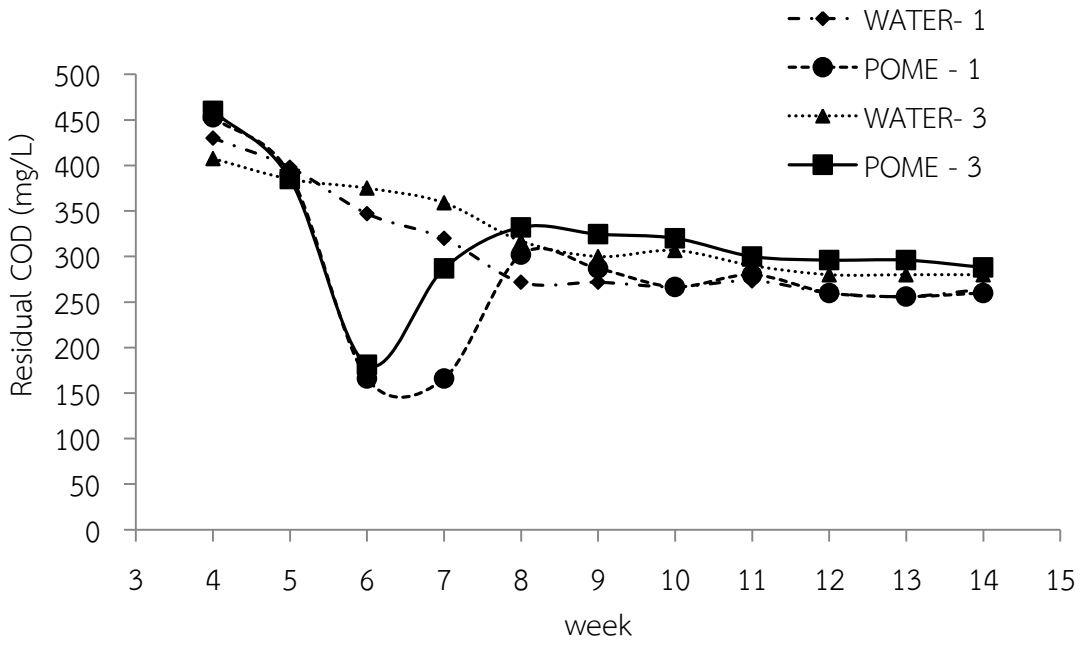
ไหลผ่านชั้นดินที่โดยทั่วไปควรมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่า 2 mS/cm (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2557) ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน และชะละลายแคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่ปนเปื้อนในดิน (Davis, 2015) ออกมา ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นที่ไหลออกจากคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนคอลัมน์ POME – 1 และ POME - 3 เมื่อเติมน้ำทิ้งที่มีพวกไอออนพวกคาร์บอเนต และไฮดรอกซิลให้ไหลผ่านชั้นดิน จะถูกดูดซับไว้ในดิน น้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์จึงมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง ส่งผลทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดลดลงด้วย โดยพวกแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดูดซับไว้ในดินนี้นี้ จัดเป็นเกลือที่ละลายน้ำยาก การเติมน้ำทิ้ง 1 และ 3 cm/week ลงดินในระยะเวลา 14 สัปดาห์จึงไม่ส่งผลทำให้เกิดปัญหาดินเค็ม (อรุณียู วะนิยม, 2558)



รูปที่ 4.26 ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในแต่ละสัปดาห์

ในช่วง 4 สัปดาห์แรก เมื่อทำการเติมน้ำทิ้งที่มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 110 – 130 NTU ผ่านคอลัมน์การบำบัดโดยดิน พบว่า คอลัมน์ POME – 1 และ POME – 3 น้ำที่ไหลออกจะมีค่าความขุ่นลดต่ำลงมาก คือมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าร้อยละ 87 ส่วนคอลัมน์ WATER – 1 และ WATER – 3 ที่ทำการเติมน้ำกลั่น น้ำที่ไหลออกจะมีค่าความขุ่นสูงกว่าค่าความขุ่นของน้ำกลั่นที่เติมลงไป และหลังจากสัปดาห์ที่ 4 ค่าความขุ่นของทั้ง 4 คอลัมน์จะมีค่าลดลงและใกล้เคียงกัน โดยคอลัมน์ POME - 3 ที่เติมน้ำทิ้งด้วยอัตราสูงกว่าคอลัมน์ POME - 1 จะมีค่าความขุ่นของน้ำที่ไหลออกต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เกิดจากในช่วงแรกมีการชะละลายของดินในคอลัมน์ออกมา สังเกตได้จากในคอลัมน์ WATER – 1 และ WATER- 3 ที่เติมน้ำกลั่น น้ำที่ไหลผ่านดินจะปรากฏค่าความขุ่น อีกทั้งช่วงแรกดินในคอลัมน์ยังไม่อัดตัวกันแน่น จึงมีโอกาสที่ดินจะชะละลายออกมา แต่หลังจาก 4 สัปดาห์แล้ว ดินจะอัดตัวกันแน่นขึ้น เม็ดดินขนาดเล็กจะแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้ช่องว่างในดินมีขนาดเล็กลง เกิดการอุดตันช่องว่างในดินจากของแข็งแขวนลอย และเกลือละลายน้ำ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ในน้ำทิ้ง หรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่จะลดขนาดช่องว่างในดิน

(Rice, 1974) ทำให้ค่าความขุ่นน้ำออกลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำที่ไหลออกในแต่ละคอลัมน์ที่ในช่วงสัปดาห์ที่ 4 แรก จะมีปริมาณน้ำไหลออกมาก และหลังจากสัปดาห์ที่ 4 ปริมาณน้ำที่ไหลออกจะลดลง เนื่องจากดินอัดตัวกันแน่นขึ้น และเกิดการอุดตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำออกที่กล่าวข้างต้น มีค่าเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการชะละลายของดินร่วมด้วย



รูปที่ 4.27 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในแต่ละสัปดาห์

ในช่วง 4 สัปดาห์แรก เมื่อทำการเติมน้ำทิ้งที่มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 900 – 1,300 mg/L ผ่านคอลัมน์การบำบัดโดยดิน พบว่า คอลัมน์ POME – 1 และ POME – 3 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 50 ส่วนคอลัมน์ WATER – 1 และ WATER – 3 ที่ทำการเติมน้ำกลั่น น้ำที่ไหลออกจะมีค่าซีโอดีสูงกว่าค่าซีโอดีของน้ำกลั่นที่เติมลงไป เช่นเดียวกับค่าความขุ่นของน้ำออกในแต่ละคอลัมน์ที่มีค่าสูงในช่วง 4 สัปดาห์แรก เนื่องจากน้ำยังสามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ง่าย เพราะดินยังไม่อัดตัวกันแน่น ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองไม่ดีมากนัก และมีการชะละลายของดินในคอลัมน์ปนเปื้อนมากับน้ำที่ไหลออก แต่หลังจากสัปดาห์ที่ 4 จะเห็นว่าน้ำที่ไหลออกทุกคอลัมน์จะมีค่าซีโอดีลดลง โดยคอลัมน์ WATER – 1 และ WATER- 3 จะมีค่าซีโอดีลดลงเรื่อยๆ และเริ่มมีค่าคงที่ แสดงถึงการชะละลายของดินในคอลัมน์ปนเปื้อนมากับน้ำที่ไหลออก ส่วนคอลัมน์ POME – 1 และ POME – 3 ที่เติมด้วยน้ำทิ้ง ในสัปดาห์ที่ 6 จะมีค่าซีโอดีลดลงต่ำมาก คือมีประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณร้อยละ 80 แต่หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนมีค่าเริ่มคงที่ ซึ่งในสัปดาห์ที่ 6 ที่มีค่าซีโอดีลดลงมากนั้น เนื่องจากด้านบนของคอลัมน์ที่ทำการทดลองเป็นแบบเปิดสามารถสัมผัสกับอากาศได้ ชั้นผิวดินจึงสัมผัสกับอากาศ ทำให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่จะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งขึ้น และหลังจากสัปดาห์ที่ 6 ที่ค่าซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ เนื่องจากระบบเริ่มเสถียร ปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้

ลดลง คอลัมน์ POME -3 จึงมีค่าซีโอดีที่สูงกว่าคอลัมน์ POME - 1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Balk *et al*. (1997) ที่ใช้ดินร่วนปนตะกอนทรายบรรจุในคอลัมน์มาบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเนื้อสัตว์ ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการถ่ายภาพ SEM บนชั้นดินจะพบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และงานวิจัยของ กาญจนี ชูทอง (2555) ที่บำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินในคอลัมน์ พบว่าน้ำทิ้งและน้ำประปาที่อัตราการเติมน้ำเท่ากัน เมื่อไหลผ่านคอลัมน์จะมีค่าซีโอดีไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากน้ำไหลผ่านช่องว่างในดินและชะสารอินทรีย์ในดินออกมา โดยในช่วงแรกค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ไหลผ่านดินจะมีค่าลดลง จนถึงจุดหนึ่ง ค่าซีโอดีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงแรกดินและจุลินทรีย์ในดินจะบำบัดน้ำทิ้งและสารอินทรีย์ได้ดี แต่หลังจากนั้นระบบเริ่มเสถียรทำให้บำบัดสารอินทรีย์ได้น้อยลง ดังนั้นการบำบัดซีโอดีโดยดิน จะต้องอาศัยกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ

หลังจากได้ศึกษากลไกที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินในแต่ละสัปดาห์แล้ว จะมาพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดรวม ตลอดระยะเวลา 14 สัปดาห์ จะพบว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินทรายปนตะกอนทราย (silty sand, SM) ที่ความลึกของชั้นดิน 75 cm ด้วยการเติมน้ำทิ้งแบบอัตราการไหลช้า คืออัตรา 1 cm/week หรือ $1.6x10^{-8}$ m/s (เติมน้ำ 72 mL/d) และอัตรา 3 cm/week หรือ $5x10^{-8}$ m/s (เติมน้ำ 217 mL/d) สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งได้ โดยอาศัยกลไกการบำบัดทางกายภาพ คือ การกรอง เกิดเมื่อน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นดินจะทำให้เกิดการสะสมของของแข็งแขวนลอยบนผิวหน้าดิน และช่องว่างในดิน เม็ดดินที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้ดินมีการอัดตัวกันแน่นขึ้น ประสิทธิภาพในการกักกันหรือการกรองก็จะสูงขึ้น (Bouwer and Chaney , 1974; Polprasert, 2007) อีกทั้งความลึก 75 cm ที่ใช้ในการทดลอง Folkman and Wachs (1970) พบว่าเป็นความลึกที่มีประสิทธิภาพในการกรองของแข็งแขวนลอยได้ดี โดยค่าของแข็งแขวนลอยนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความขุ่น คือ ถ้าของแข็งแขวนลอยลดลงจะทำให้ค่าความขุ่นลดลงด้วย จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นที่อัตรา 3 cm/week มีค่าร้อยละ 88.75 และ 96.7 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่อัตรา 1 cm/week ที่มีค่าร้อยละ 70 และ 73.6 ตามลำดับ เนื่องจากดินในคอลัมน์ที่เติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week จะอัดตัวกันแน่น มีการสะสมของอนุภาคบนผิวดินและในช่องว่างของดินมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพการกรองจึงสูงกว่า นอกจากของแข็งแขวนลอยและความขุ่นที่ดินสามารถบำบัดได้แล้วนั่น ดินยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปละลายและไม่ละลายน้ำได้ เช่น สี ซีโอดี ทีโอซี และดีโอซี ดังงานวิจัยของ ธิดารัตน์ บุญศรี (2543) ที่สามารถลดสีและสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะได้ ด้วยกลไกการดูดซับ และการกรองโดยดิน Smith (1976) ที่สามารถบำบัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 98 ในน้ำเสียโรงงานมันฝรั่งด้วยดินลึก 1.5 m และ Chapman *et al*. (1995) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ (ดีโอซี) โดยดินได้ร้อยละ 16 – 45 ด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพและการดูดซับโดยดิน

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในคอลัมน์ ในระยะเวลา 14 สัปดาห์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	น้ำทิ้ง	อัตราการเติมน้ำทิ้ง			
		1 cm/week (72 mL/d)		3 cm/week (217 mL/d)	
		ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย	ร้อยละของการบำบัด	ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย	ร้อยละของการบำบัด
พีเอช	8.3 – 8.5	8.6	-	8.55	-
ความขุ่น (NTU)	110 -130	31.6	73.6	3.96	96.7
UV_{254} (cm^{-1})	10 - 12	5.81	47.2	7.14	35.1
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 - 8	4.128	44.9	4.094	45.4
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	566	65.7	709	57
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)	170 - 250	54	70	23.1	88.45
ซีโอดีทั้งหมด (mg/L)	900 – 1,300	247.6	75.2	285.7	71.4
ซีโอดีละลายน้ำ (mg/L)	600 - 800	203.2	70.9	253.9	63.7
ทีโอซี (mg/L)	600 - 700	173.2	73.4	181.9	72.02
ดีโอซี (mg/L)	180 - 220	99.5	50.3	118.4	40.8
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	5.8	-	6.0	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (µm)	21 - 22	3.5	-	3.0	-

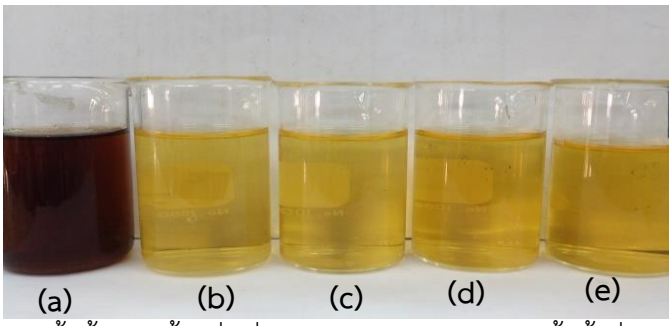
ซึ่งจากตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่าการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 1 cm/week จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่าการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week ซึ่งแตกต่างกับประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่น เนื่องจากในการทดลองได้ควบคุมให้มีสภาวะใกล้เคียงกันในทุกคอลัมน์ การบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นที่อาศัยกลไกการกรองเป็นหลัก เมื่อเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week จะทำให้ดินอัดตัวกันแน่นขึ้น มากกว่าอัตรา 1 cm/week ประสิทธิภาพการกรองก็จะดีขึ้น แต่ในการบำบัดสารอินทรีย์ละลายและไม่ละลายน้ำที่อาศัยกลไกทางชีวภาพ การกรอง และการดูดซับ เมื่อเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 1 cm/week จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในรูปของ UV_{254} สี ซีโอดีละลายน้ำ และดีโอซี ได้ดีกว่าการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week อย่างชัดเจน ส่วนสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีทั้งหมด และทีโอซี การเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 1 cm/week จะมีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าอัตรา 3 cm/week เล็กน้อย เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ไม่

ละลายน้ำส่วนใหญ่ในรูปซีโอดีทั้งหมด และทีโอซี จะสามารถบำบัดได้ด้วยกลไกการกรอง แต่สารอินทรีย์ละลายน้ำในรูป UV_{254} สี ซีโอดีละลายน้ำ และดีโอซี จะอาศัยกลไกการย่อยสลายและการดูดซับ ซึ่งเมื่อเติมด้วยอัตรา 3 cm/week ทำให้มีสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบบำบัดโดยดินในปริมาณมาก ดินและจุลินทรีย์ในดินจึงไม่สามารถที่จะย่อยสลายหรือดูดซับไว้ได้ทั้งหมด ทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปละลายน้ำของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 1 cm/week จึงหลงเหลือในปริมาณน้อยกว่าอัตรา 3 cm/week สอดคล้องกับสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 1 cm/week จะมีลักษณะสีเหลืองที่อ่อนกว่าการเติมด้วยอัตรา 3 cm/week และมีค่าสีในหน่วย ADMI ที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (c, e) และตารางที่ 4.3 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ พัชร สนั่นพัฒนพงศ์ (2555) ที่บำบัดน้ำทิ้งโรงงานน้ำยางข้นโดยดินในสวนปาล์ม พบว่าการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 0.5 cm/week จะมีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ต่ำกว่า แต่จะบำบัดซีโอดีได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week

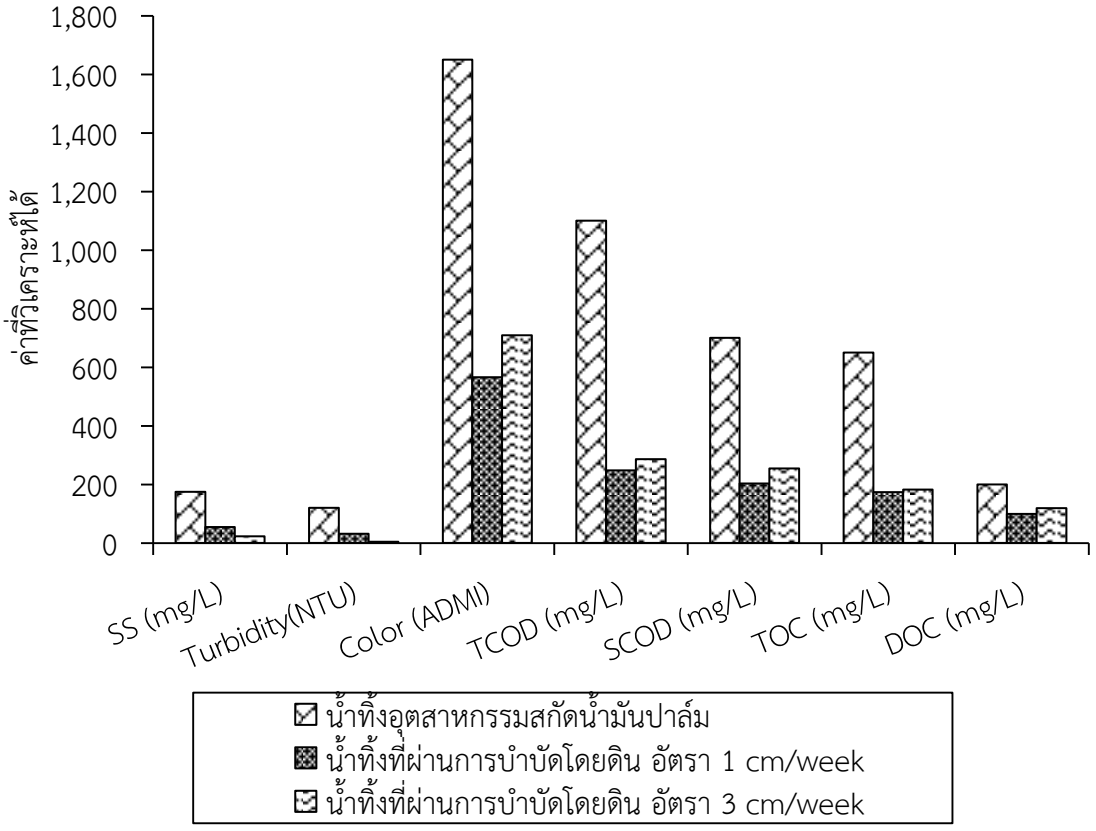
ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินทรายปนตะกอนทราย (silty sand, SM) ต้องอาศัยกลไกทางกายภาพ คือการกรอง และการดูดซับเนื่องจากในดินมีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบอยู่บ้าง กลไกทางเคมี คือการแลกเปลี่ยนไอออน และกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ (Hassink *et al*., 1997) ซึ่งจากผลทดลองควรเลือกการเติมน้ำทิ้งที่อัตราการ 3 cm/week เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นได้ดี ส่วนกลุ่มสารอินทรีย์อาจมีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่อัตรา 1 cm/week เล็กน้อย แต่สามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ในปริมาตรสูงกว่าถึง 3 เท่า

จากการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินทรายปนตะกอนทราย (silty sand, SM) ที่มีขนาดเม็ดดินในช่วงน้อยกว่า 0.01 – 2 mm เป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์ พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจะมีการปนเปื้อนจากการชะละลายของดินในคอลัมน์ จึงทดลองเปรียบเทียบกับการกรองด้วยทรายกรองสะอาด เพื่อลดปัจจัยที่จะเกิดจากการชะละลายของดิน โดยทดลองใช้น้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจากแหล่งเดียวกันมาบำบัดด้วยการกรองทราย (sand filtration) แบบ deep bed ใช้ทรายกรองสะอาดมีขนาด 0.65 mm uniformity coefficient น้อยกว่า 1.73 เดินระบบด้วยอัตรา 3, 5, 9 และ 12 m^3/m^2-hr พบว่าการกรองด้วยอัตรา 12 m^3/m^2-hr จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นได้ดีที่สุด แต่จะเกิดการอุดตันขึ้นเร็วบนผิวหน้าทรายกรอง ทำให้ต้องล้างย้อนบ่อยๆ ซึ่งถ้าเลือกใช้ที่อัตรา 9 m^3/m^2-hr จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงมาเล็กน้อย แต่สามารถเดินระบบได้เป็นระยะเวลานานขึ้น คือ 10 hr และกรองน้ำทิ้งได้ 90 m^3/m^2 โดยที่อัตรานี้จะมีประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอย ความขุ่น บีโอดี และซีโอดีได้ร้อยละ 40.82, 23.83, 51.28 และ 66.74 ตามลำดับ มีขนาดอนุภาคในน้ำที่ผ่านการกรองอยู่ในช่วง 6 - 15 µm แต่ไม่สามารถบำบัดสี (หน่วย ADMI) ในน้ำทิ้งได้ (สรนันท์ นิลตีบ และเสาวรส หนูสุข, 2556) จากการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าการบำบัดโดยการกรองทราย ที่อาศัยกลไกการกรองเพียงอย่างเดียว มีข้อดีคือไม่มีการชะสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในทรายออกมา สามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ในปริมาณมาก ใช้ระยะเวลาน้อย บำบัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ได้บางส่วน สามารถล้างย้อนเพื่อนำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ไม่สามารถบำบัดสารที่อยู่ในรูปละลายน้ำ เช่น สี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดโดยดินทรายปนตะกอนทราย ที่อัตรา 3 cm/week หรือ $5x10^{-8}$ m/s จะมีประสิทธิภาพในการ

บำบัดที่ดีกว่าการกรองทรายอัตรา 9 m^3/m^2-hr หรือ 2.5 x 10^{-3} m/s ดังนั้นถึงแม้การบำบัดโดยดินจะมีการชะละลายของดินปนเปื้อนมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดก็ยังจะสูงกว่าการกรองทราย เนื่องจากการบำบัดโดยดินจะมีขนาดของเม็ดดินที่คละกัน ทำให้ช่องว่างในดินมีขนาดที่แตกต่างกัน จึงสามารถกรองหรือกักกันอนุภาคในน้ำทิ้งได้ดีกว่า และในดินยังเกิดกลไกการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และกลไกการดูดซับจากดินเหนียวที่เป็นส่วนประกอบในดินอีกด้วย



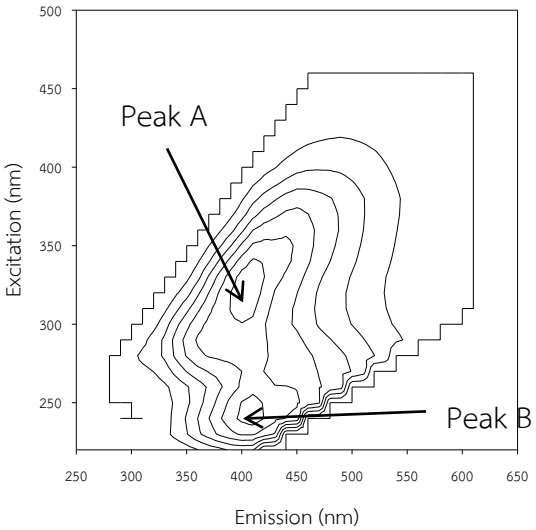
รูปที่ 4.28 สีของ (a) น้ำทิ้ง (b) น้ำกลั่นที่ผ่านดิน 1 cm/week (c) น้ำทิ้งที่ผ่านดิน 1 cm/week (d) น้ำกลั่นที่ผ่านดิน 3 cm/week (e) น้ำทิ้งที่ผ่านดิน 3 cm/week



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ในระยะเวลา 14 สัปดาห์

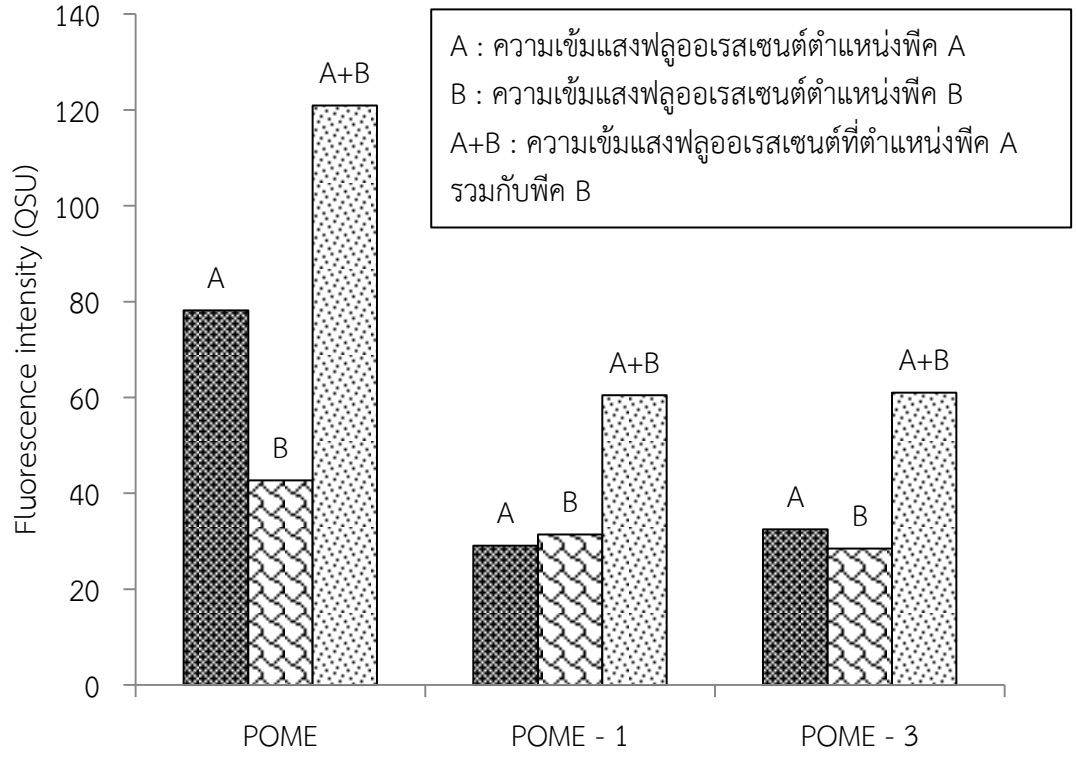
4.3.3 กลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

จากรูปที่ 4.28 เห็นได้ว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินจะมีสีเหลืองเช่นเดียวกับน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน แต่จะเป็นสีเหลืองที่มีความเข้มมากกว่า สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสี (ADMI) ที่มีค่าสูงกว่า และเมื่อสังเกตค่า SUVA จะมีค่ามากกว่า 4 L/mg-m ดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงถึงการมีสารอินทรีย์กลุ่ม humic เป็นส่วนใหญ่ ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) พวกหมู่ฟังก์ชัน aromatic (Edzwald and Benschoten, 1990; Swietlik and Sikorska, 2005; Owen *et al*., 1993) เช่นเดียวกับในน้ำทิ้ง ดังนั้นการบำบัดโดยดินสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้บางส่วน แต่ก็จะมีสารอินทรีย์ที่เกิดจากการชะละลายของดินปนเปื้อนออกมาด้วย จึงทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังคงมีกลุ่มสารอินทรีย์อยู่ และเมื่อทำการวิเคราะห์กลุ่มสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ด้วยเทคนิค FEEM พบว่า การเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 1 และ 3 cm/week จะปรากฏพีคที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน คือ ที่ตำแหน่ง A มีค่า Ex_{max} / Em_{max} = 325 nm / 400 nm และที่ตำแหน่ง B มีค่า Ex_{max} / Em_{max} = 240 nm / 410 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายได้ว่า ที่ตำแหน่ง A มีค่า excitation wavelengths มากกว่า 280 nm และมีค่า emission wavelengths มากกว่า 380 nm จัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท humic acid – like ส่วนที่ตำแหน่ง B มีค่า excitation wavelengths น้อยกว่า 250 nm และมีค่า emission wavelengths มากกว่า 380 nm จัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท fulvic acid – like ส่วนค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่า การเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 1 cm/week จะมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ที่พีค A และ B เท่ากับ 29.1 และ 31.4 QSU ตามลำดับ ส่วนการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week จะมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ที่พีค A และ B เท่ากับ 32.5 และ 28.5 QSU



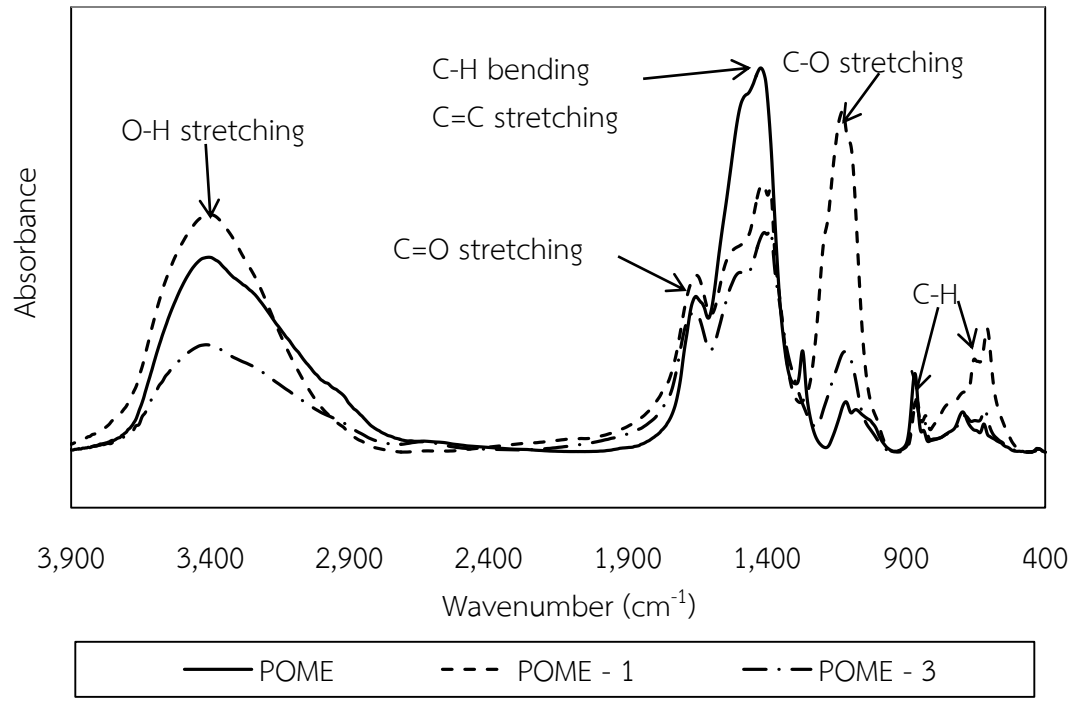
รูปที่ 4.30 การจำแนกน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 1 และ 3 cm/week โดยเทคนิค Fluorescence excitation emission matrix (FEEM)

จากผลการวิเคราะห์ FEEM ของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ตรวจพบพีค 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งพีค A Ex_{max} / Em_{max} = 360 nm / 450 nm มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ 78.2 QSU และตำแหน่งพีค B Ex_{max} / Em_{max} = 290 nm / 450 nm มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ 42.7 QSU ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ที่จัดเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำประเภท humic acid – like เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ FEEM ของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในข้างต้นนั้น เห็นได้ว่าการบำบัดโดยดินสามารถที่จะกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในกลุ่มประเภท Humic acid – like ที่ประกอบพวกหมู่ฟังก์ชันอะโรมาติกได้ เนื่องจากน้ำทิ้งเริ่มต้นปรากฏสีน้ำตาลที่เกิดจากกลุ่ม humic acid เป็นหลัก แต่เมื่อผ่านการบำบัดจะปรากฏเป็นสีเหลืองเข้ม ที่เกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม fulvic acid เป็นส่วนใหญ่ (Stevenson, 1982) จึงอาจกล่าวได้ว่า การบำบัดโดยดินสามารถบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในกลุ่ม humic acid ได้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสี และดีโอซี ที่การบำบัดโดยดินมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ร้อยละ 55 – 65 และ 40 – 50 ตามลำดับ จากกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ การดูดซับ และการกรอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 อีกทั้งสอดคล้องกับค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์รวม (A+B) ของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 1 และ 3 cm/week ที่มีค่าลดลงร้อยละ 50 และ 49.5 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.31

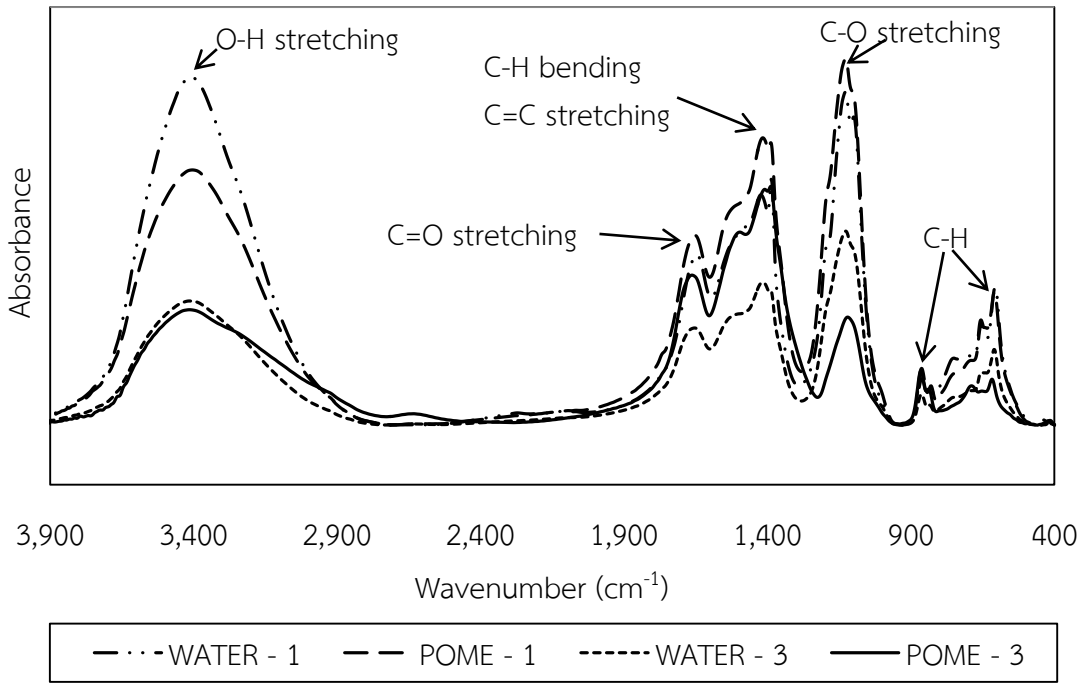


รูปที่ 4.31 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ในน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM พบว่าในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินควรหลงเหลือสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก พวกหมู่ฟังก์ชันที่เป็นพันธะเดี่ยว หรือพันธะคู่มากกว่าพวกอะโรมาติก จึงได้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อเปรียบเทียบการปรากฏพีคของตัวอย่างน้ำทิ้ง กับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่รดน้ำด้วยอัตรา 1 และ 3 cm/week ที่ตำแหน่งความถี่ต่างๆ โดยได้ควบคุมปริมาณตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มีปริมาณเท่ากัน พบว่าในน้ำทิ้งปรากฏพีคที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ของพวก aromatic hydroxyl group ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ของพวก carboxyl ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ C=C stretching ความถี่ 1,272, 1,116 และ 1,080 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ของพวก carboxyl และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำทิ้ง เมื่อนำน้ำทิ้งมาผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 1 cm/week จะปรากฏพีคต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 1,422 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H bending และ C=C stretching แต่จะปรากฏพีคสูงกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic hydroxyl group ความถี่ 1,400 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,150 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching และความถี่ 700 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ซึ่งตำแหน่งที่ปรากฏพีคสูงกกว่าน้ำทิ้งนั่น อาจไม่ได้เกิดจากกลุ่มสารอินทรีย์ที่ตรวจพบในน้ำทิ้ง แต่เกิดจากการชะละลายของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดินที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง ดังงานวิจัยของ Robertson (2013) ที่ทำการวิเคราะห์ดินที่ใช้ในทางเกษตรกรรมด้วยเทคนิค FTIR จะปรากฏพีคที่ตำแหน่งความถี่ 3,800 cm^{-1} จัดเป็นพวก clay minerals ความถี่ 2,800 – 2,900 cm^{-1} และ 1,300 – 1,700 cm^{-1} เป็นพวก organic matter และความถี่ 500 – 1,000 cm^{-1} เป็นพวก mineral งานวิจัยของ Matejkavs and Simon (2012) ตรวจพบพีคที่ตำแหน่งความถี่ 2,800 – 3,000 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C–H band (hydrophobic) และความถี่ 1,600 – 1,740 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-O band (hydrophilic) และงานวิจัยของCox *et al*. (2000) ตรวจพบความถี่ 3,400, 2,925, 2,858 และ 1,730 cm^{-1} เป็นพวก soil humic compounds และ 900 - 1,150 cm^{-1} เป็นพวก Si–O stretch ที่พบได้ในดินทราย (Zaker *et al*., 2013) ส่วนการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินด้วยอัตรา 3 cm/week จะปรากฏพีคที่ต่ำกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic hydroxyl group (O-H stretching) ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ aromatic C-C stretching และจะปรากฏพีคสูงกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 1,150 cm^{-1} เป็นพวก Si–O stretch ที่พบได้ในดินทราย (Zaker *et al*., 2013) ดังแสดงในรูปที่ 4.32 อีกทั้งตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ FEEM นั้นเป็นตัวอย่างที่ผ่านการ freeze dry ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์อาจเกิดการสัมผัสกับอากาศและความชื้นทำให้ที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} ปรากฏพีคที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าว เป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่สามารถพบได้ในองค์ประกอบน้ำ (Baharuddin *et al*., 2011)



รูปที่ 4.32 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)



รูปที่ 4.33 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำกลั่นและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เห็นได้ว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินด้วยอัตรา 1 cm/week จะปรากฏพีคที่สูงกว่าน้ำทิ้งในตำแหน่งความถี่ต่างๆ มากกว่าการบำบัดด้วยอัตรา 3 cm/week เนื่องจากในอัตรา 3 cm/week ดินจะมีการอัดตัวกันแน่น ทำให้มีการชะลายของดินในคอลัมน์ได้น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.33 ที่ทำการวิเคราะห์น้ำกลั่นและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ที่อัตราการเติมน้ำเท่ากัน จะปรากฏพีคของน้ำกลั่นและน้ำทิ้งที่ตำแหน่งเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าพีคที่ปรากฏเกิดจากการชะละลายของดินในคอลัมน์ ดังนั้นการบำบัดโดยดินทรายปนตะกอนทราย ที่ประกอบด้วยดินทราย ดินเหนียว และดินตะกอนทราย ในอัตราการเติมน้ำทิ้ง 1 cm/week จึงอาจชะพวก clay minerals, soil humic compounds, Si–O stretch ที่พบได้ในดินทราย และ แร่ธาตุอื่นๆ ออกมามากกว่าการเติมน้ำทิ้งในอัตรา 3 cm/week นั่นเอง

4.4 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการบำบัดโดยดิน ร่วมกับการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

จากการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีทางกายภาพเคมี คือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่อาศัยกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มด้วยผลึก (sweep coagulation) และการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับชีวภาพ คือการบำบัดโดยดิน ที่อาศัยกลไกการกรอง การย่อยสลายทางชีวภาพและการดูดซับนั้น เห็นได้ว่าจากผลการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกลไกที่แตกต่างกัน จะทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จะพบว่าการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางกายภาพเคมี จะมีความเหมาะสมมากกว่า โดยดูจากปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด และลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัด แต่เนื่องด้วยกลไกนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งในการสารเคมี การก่อสร้างระบบบำบัด และค่าดำเนินการระบบ หากจะบำบัดเพื่อปล่อยทิ้งอย่างเดียวอาจไม่เหมาะสม จึงควรที่จะมีการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่นๆ ที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆที่ ใช้การบำบัดโดยกลไกทางกายภาพเคมีร่วมกับเมมเบรน เช่น กัลยา (2542) ที่บำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่าในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 0.4 – 0.8 mg/L และกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกัน เนื่องจากน้ำทิ้งมีความเป็นด่างสูง ทำให้ปริมาณสารส้มไม่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดตะกอนได้ และลักษณะของฟาวลิงที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ Standard Blocking Filtration Model (SBM) คือมีอนุภาคขนาดเล็กอุดตันในรูพรุนเมมเบรน โดยไม่มีการสะสมบนผิวหน้า แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันใช้สารส้มในปริมาณไม่เหมาะสม ที่จะสามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กได้ Ahmad *et al*. (2006) ก็เช่นกันที่ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน คือสารส้มร่วมกับโพลิเมอร์ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ก่อนเข้าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO 200000 พบว่าเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดผ่านเมมเบรนอัลตราฟลิเตรชันจะมีค่าฟลักซ์ลดลงร้อยละ 50 เมื่อทำการกรอง 6 hr. ขึ้นไป ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการโคแอกกูเลชันร่วมกับอัลตราฟิลเตรชันยังมีค่าซีโอดี ของแข็งละลายน้ำสูง คือ 12,400 และ 6,640 mg/L ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำมากรองผ่านเมมเบรนรีเวิร์สออสโมซิส พบว่าจะมีค่าฟลักซ์ลดลงร้อยละ 50 เมื่อทำการกรอง 23 hr. ขึ้นไป โดยเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด จะเกิดอุดตันแบบ cake formation บนผิวเมมเบรนและฟลักซ์มี

ค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 80 – 90 หลังจากล้างเมมเบรนด้วยสารเคมี โดยคุณภาพน้ำที่ผ่านเมมเบรนรีเวิร์สออสโมซิสสามารถนำมาใช้เป็นน้ำดื่มตามมาตรฐานของ USEPA ได้ งานวิจัยที่ใช้กลไกการบำบัดทางกายภาพร่วมกับเมมเบรน เช่น Wu *et al*. (2007) ทำการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการกรองหิน ทราย และกระดาษกรอง 8 μm ก่อนเข้าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน MWCO 20,000 พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำ และ ซีโอดีได้มากว่าร้อยละ 97.7, 88.5, 6.5 และ 57 ตามลำดับ โดยจะเกิดฟาวลิงแบบ pore plugging

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง กับค่าเฉลี่ยของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและบำบัดโดยดินในคอลัมน์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	**ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย**				
		กระบวนการโคแอกกูเลชัน		**การบำบัดโดยดิน**	
	น้ำทิ้ง	**สารส้ม 3.5 g/L พีเอช 5.5**	**โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L พีเอช 6.5**	**อัตรา 1 cm/week**	**อัตรา 3 cm/week**
พีเอช	8.3 – 8.5	5.5	6.5	8.6	8.55
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	3.1	3.05	31.6	3.96
UV_{254} (cm^{-1})	10 - 12	2.27	2.24	5.81	7.14
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 - 8	7.032	7.078	4.128	4.094
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	270	209	566	709
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	170 - 250	21	20	54	23.1
ซีโอดีทั้งหมด (mg/L)	900 – 1,300	236.06	209.83	247.6	285.7
ซีโอดีละลายน้ำ (mg/L)	600 – 800	157.37	131.14	203.2	253.9
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	168.5	163.8	173.2	181.9
ดีโอซี (mg/L)	180 – 220	68.52	67.46	99.5	118.4
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	3.31	3.32	5.8	6.0
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	21 - 22	3.4	3.1	3.5	3.0

จากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมาบำบัดด้วยกลไกต่างๆร่วมกับเมมเบรน คือ 1) กลไกทางกายภาพเคมีร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน นั่นคือการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำทิ้ง ซึ่งจะมีการหาความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนในกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อนที่จะนำเข้าเมมเบรน 2) กลไกทางกายภาพ/ชีวภาพร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน นั่นคือการใช้ดินในสวนปาล์มที่บรรจุคอลัมน์บำบัดน้ำทิ้งก่อนเข้าเมมบรน โดยจะนำมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรน รวมทั้งกลุ่มสารอินทรีย์ในรูปของสี UV_{254} ซีโอดี และทีโอซี การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ค่าดัชนีตะกอน (Silt density index, SDI) ส่วนเมมเบรนจะวิเคราะห์ค่าฟลักซ์ รูปแบบของการเกิดฟาวลิง ภาพถ่ายผิวเมมเบรนด้วยเทคนิค SEM และแร่ธาตุบนผิวเมมเบรนด้วยเทคนิค EDX รวมทั้งศึกษาความสามารถในการควบคุมฟาวลิงของกลไกการบำบัดที่ใช้ร่วมกับเมมเบรน

4.4.1 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรนไมโครฟลิเตรชัน

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งและงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง พบว่าในน้ำทิ้งมีปัจจัยที่ทำให้เกิดอุดตันประเภทต่างๆ บนเมมเบรนได้ ซึ่งในการทดลองได้ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ผลิตจาก Polyethersulfone (PES) มีรูพรุนขนาด 0.45 μm เดินระบบแบบ dead – end ที่ความดัน 1 bar ทำการกรองน้ำกลั่นผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่า มีค่าฟลักซ์เฉลี่ยของน้ำกลั่น 21,477.64 L/m^2-hr สอดคล้องกับคุณสมบัติของเมมเบรนที่ควรมีค่าฟลักซ์น้ำกลั่นมากกว่า 19,200 L/m^2-hr (satorius, 2015) และมีความต้านทานของเมมเบรน (membrane resistance; R_m) 1.87×10^{10} m^{-1} ดังแสดงในสมการที่ (4.2) เมื่อทดลองกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน เพื่อสังเกตการอุดตันที่เกิดขึ้น พบว่าในนาทีที่ 2 หลังจากทำการกรองค่าฟลักซ์จะลดลงประมาณร้อยละ 65 และเมื่อกรองจนถึง 37 min สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ปริมาตรประมาณ 29 mL ฟลักซ์มีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ย 70.41 L/m^2-hr ดังแสดงในรูปที่ 4.34 ซึ่งหลังจากนั้นน้ำทิ้งไม่สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ จึงนำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด แล้วหาประสิทธิภาพการกรองของเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง พบว่ามีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 14,881.29 L/m^2-hr ทำให้มีค่าความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง เท่ากับ 2.7×10^{10} m^{-1} ดังแสดงในสมการที่ (4.3) ดังนั้น เมมเบรนจะมีความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f) เท่ากับ 8.27×10^9 m^{-1} ดังแสดงในสมการที่ (4.4) เป็นการสะสมและอุดตันของอนุภาคบนผิวและในรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งไม่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำสะอาด ส่วนความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance, R_p) เท่ากับ 5.67×10^{12} m^{-1} ดังแสดงในสมการที่ (4.5) เป็นการอุดตันของอนุภาคที่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำสะอาด โดยค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดลองควรมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากในสมการที่ (4.5) ได้แทนด้วยค่าความหนืดค่าของน้ำกลั่น ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้ง ดังนั้นค่าความต้านทานรวมของการไหลที่กรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้ และทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้เช่นกัน

ความต้านทานของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (membrane resistance; R_m)

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w} = \frac{100{,}000 \text{ Pa}}{\left(8.9793 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}\right)\left(21{,}477.64 \frac{\text{L}}{\text{m}^2\text{hr}}\right)\left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)\left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}\right)} \quad (4.2)$$

$$= 1.87 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (m^{-1})

ΔP = ความดันที่ให้ระบบ (Pa)

μ_w = ความหนืดของน้ำสะอาด (Pa.s) มีค่า 8.9793×10^{-4} Pa.s

J_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดก่อนการใช้งาน (m^3/m^2s)

ความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง

$$R_m + R_f = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w'} = \frac{100{,}000 \text{ Pa}}{\left(8.9793 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}\right)\left(14{,}881.29 \frac{\text{L}}{\text{m}^2\text{hr}}\right)\left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)\left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}\right)} \quad (4.3)$$

$$= 2.7 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

เมื่อ $R_m + R_f$ = ความต้านทานของเมมเบรนรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง

J_w' = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเมมเบรนและล้างด้วยน้ำสะอาดแล้ว (m^3/m^2s)

ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f)

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m = (2.7 \times 10^{10}) - (1.87 \times 10^{10}) = 8.3 \times 10^9 \text{ m}^{-1} \quad (4.4)$$

ความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance, R_p)

$$R_p = R_t - (R_m + R_f) = \frac{\Delta P}{\mu J} - (R_m + R_f) \quad (4.5)$$

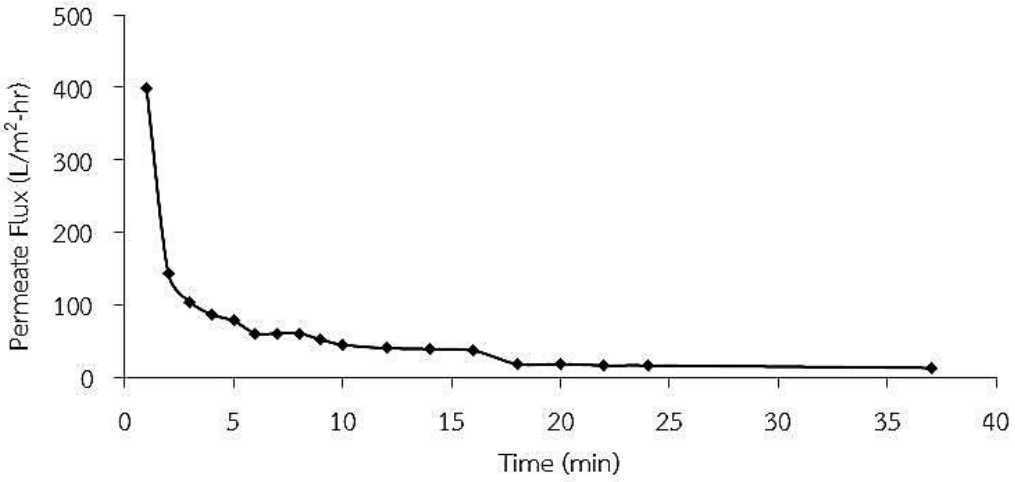
$$= \frac{100{,}000 \text{ Pa}}{\left(8.9793 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}\right)\left(70.41 \frac{\text{L}}{\text{m}^2\text{hr}}\right)\left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)\left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}\right)} - \left(2.7 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}\right)$$

$$= 5.67 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

เมื่อ R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหล (m^{-1})

ΔP = ความดันที่ให้ระบบ (Pa)

μ = ความหนืดของน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรน (Pa.s)
หมายเหตุ ใช้ค่าความหนืดของน้ำกลั่น = 8.9793 x 10^{-4} Pa.s
J = ฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรน (m^3/m^2s) (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2542)



รูปที่ 4.34 ค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ความดัน 1 bar กับเวลา

จากการกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน เห็นได้ว่าค่าความต้านทานเมมเบรนที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง เนื่องจากในการทดลองเป็นการเดินระบบแบบ dead –end จึงทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในน้ำทิ้งสะสมอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนอย่างรวดเร็ว เรียกว่าการเกิด concentration polarization (CP) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยค่าความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (R_p) โดยการเกิด CP นี้จะนำไปสู่การเกิดฟาวลิงแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible fouling) ที่มีลักษณะอนุภาคอุดตันหรือถูกดูดซับในรูพรุนและบนผิวเมมเบรน (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2542) ทำให้ในการทดลองจึงมีค่าความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (R_p) สูงกว่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (R_f) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ได้ทำการวิเคราะห์ในบทที่ 4.1 พบว่ามีปัจจัยที่ทำให้เกิดการอุดตัน ดังนี้

1) Particulate / Colloid fouling เกิดจากของแข็งแขวนลอย อนุภาคคอลลอยด์ และของแข็งละลายน้ำที่อยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในน้ำทิ้ง พบว่ามีขนาดตั้งแต่ 0.2 – 130 μm โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 21 - 22 μm ดังนั้นหากใช้แรงดันขับเคลื่อนน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (MF) ที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าขนาดอนุภาคในน้ำทิ้ง อนุภาคเหล่านั้นจะไปอุดตันบนผิวด้านบนของเมมเบรน เกิดเป็น cake – Layer ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง แต่ถ้าใช้เป็นเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุนใหญ่กว่าขนาดอนุภาค จะเกิดการอุดตันทั้งในรูพรุน และผิวด้านบนของเมมเบรน เรียกว่า pore plugging และ cake – Layer โดยรูปแบบการอุดตันที่เกิดจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคในน้ำทิ้ง และขนาดรูพรุนของเมมเบรน (Franken, 2009)
2) Organic fouling เกิดจากกลุ่มสารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter; NOM) ซึ่ง จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ เช่น คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) น้ำหนัก

โมเลกุลหรือขนาดโมเลกุล (molecular weight or size) และความหนาแน่นประจุ (charge density) โดยในงานวิจัยได้วิเคราะห์สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยดัชนีคุณภาพน้ำต่างๆ ดังนี้

- ในน้ำทิ้งมีค่าซีโอดี 900 – 1300 mg/L ส่วนทีโอซีมีค่า 600 – 700 mg/L
- ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำที่อยู่ในน้ำทิ้ง พบว่า ซีโอดีละลายน้ำ มีค่า 600 – 800 mg/L ดีโอซีมีค่า 180 – 220 mg/L และ UV_{254} มีค่า 10 - 12 cm^{-1}
- SUVA เป็นตัวบ่งชี้การมีกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำ ซึ่งในน้ำทิ้งที่วิเคราะห์มีค่า $SUVA_{254}$ 4.5 – 6.7 L/mg-m โดยมีค่ามากกว่า 4 L/mg-m จึงจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) สูง พวกกลุ่ม aromatic และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งจะพบใน humic acid และ hydrophobic acid (Swietlik and Sikorska, 2005; Pernitsky and Edzwald, 2006)
- FEEM พบกลุ่มสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้ง humic acid – like และ fulvic acid – like

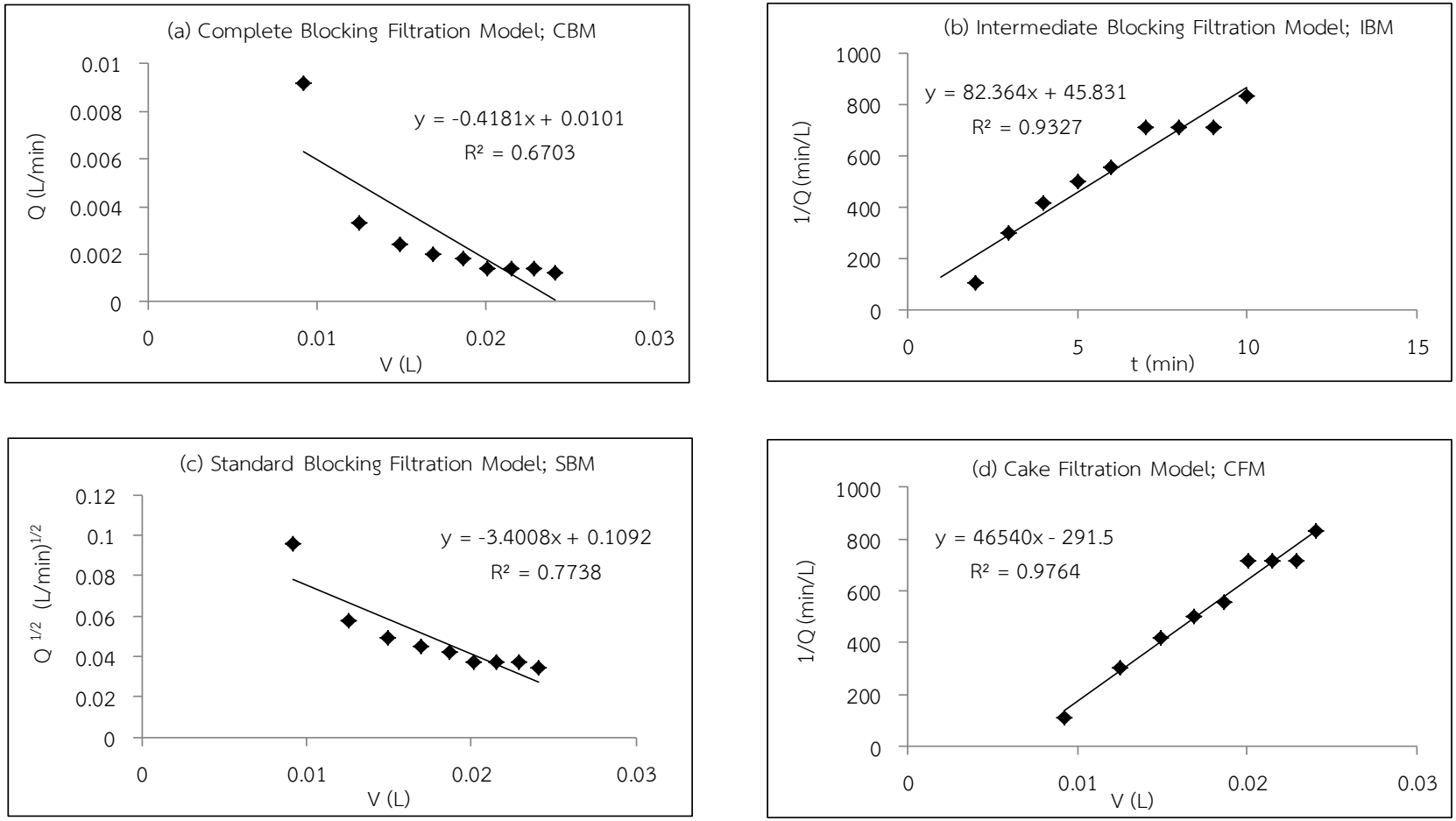
จากดัชนีคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์จะเห็นได้ว่า น้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม มีการปนเปื้อนของกลุ่มสารอินทรีย์ ทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำ ซึ่งส่งผลต่อการเกิดการอุดตันของเมมเบรน โดยสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำนั้นหมายรวมถึงของแข็งแขวนลอยและอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายตัวในน้ำทิ้ง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1) ที่จะทำให้เกิดการอุดตันทั้งแบบ pore plugging และ cake – layer และเมื่อรวมถึงสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำด้วยแล้ว สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะอาศัยการดูดซับ ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวและรูพรุนของเมมเบรนแบบ gel – layer และ pore narrowing (Holman and Ohlinger, 2007) ดังนั้น organic fouling จะมีกลไกการอุดตันหลายๆรูปแบบ (Franken, 2009)

3) Microbial / Biological fouling เกิดจากกลุ่มจุลินทรีย์และสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำ ทำให้สร้างเป็น biofilm ขึ้น โดยสารอาหารจะถูกดูดซับบนเมมเบรน จุลินทรีย์จึงเจริญเติบโตบนผิวของเมมเบรน แต่จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณออกซิเจน สารอาหาร การไหลผ่านเมมเบรน เป็นต้น จากงานวิจัยของ Soleimaninanadegani and Mansh (2014) และ Ohimain (2012) ตรวจพบสิ่งมีชีวิตในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ทั้งพวกแบคทีเรีย คือ *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Staphylococcus* aureus และ *Bacillus* และฟังไจ คือ *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Mucor* และ *Candida* โดย Rosas *et al.*, (2014) ทำการศึกษากลไกฟาวลิงของ *Pseudomonas* บนเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ผลิตจาก PES พบว่าทำให้เกิดดารอุดตันแบบ intermediate blocking model (IBM) ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้พบได้ในน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ดังนั้นหากกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรน สามารถที่จะเกิดเป็น biofilm ขึ้นได้

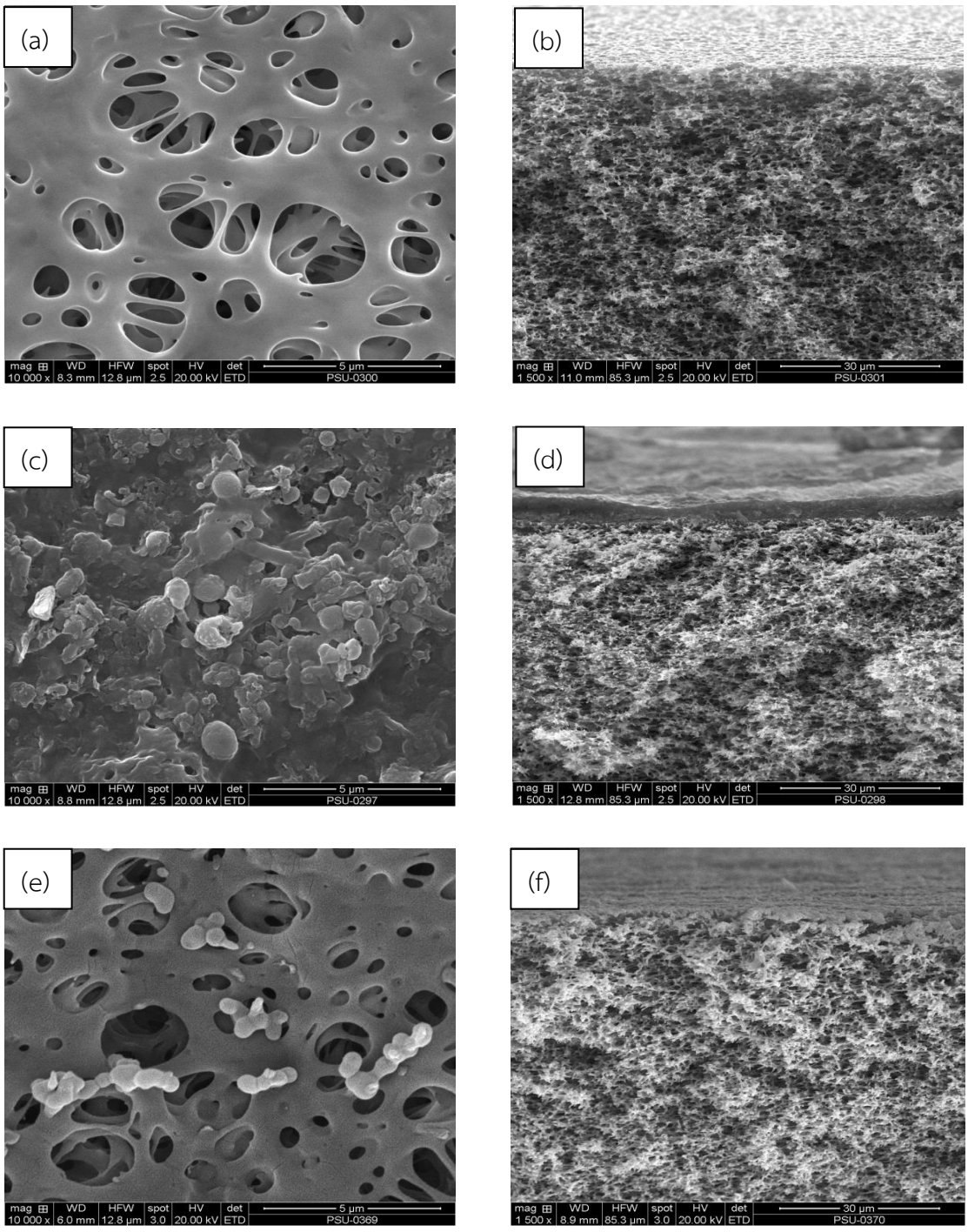
4) Inorganic / Scaling เกิดจากสารอนินทรีย์ โลหะไฮดรอกไซด์ และพวกคาร์บอเนต ที่สะสมบนผิวหรือรูพรุนของเมมเบรน ไอออนหลักๆที่ทำให้เกิด scaling คือ แคลเซียม

แมกนีเซียม ไบคาร์บอเนต ซัลเฟต ซิลิกา เหล็ก และแบเรียม (Franken, 2009) โดยในการวิจัยได้วิเคราะห์ด้วยดัชนีคุณภาพน้ำต่างๆ คือพีเอช ความเป็นด่าง และการนำไฟฟ้า ซึ่งความเป็นด่างในทางปฏิบัติถือว่าเกิดจากไอออน 3 ชนิดหลักๆ คือ ไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2547) พบว่า น้ำทิ้งมีค่าความเป็นด่าง 2,500 – 4,000 mg/L as $CaCO_3$ และการนำไฟฟ้า 7 – 8 mS/cm บ่งชี้ว่าในน้ำทิ้งมีการปนเปื้อนของไอออนต่างๆ ที่อาจทำให้เกิดฟาวลิงประเภทนี้ได้

จากปัจจัยต่างๆในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนและบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จึงนำมาอธิบายด้วยแบบจำลองการอุดตันของ Hermia (1952) โดยการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Cake Filtration Model (CFM) จะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด คือมีค่า r^2 = 0.98 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (d) ซึ่งแบบจำลอง CFM สามารถอธิบายได้ว่าการกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีลักษณะการอุดตันส่วนใหญ่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุนอุดตันอยู่ภายในรูพรุนของเมมเบรนและมีการซ้อนทับกันบนผิวเมมเบรน เรียกว่า pore narrowing และ pore plugging จนเกิดการสะสมของอนุภาคอย่างหนาแน่นเป็นเค้กบนผิวหน้าและปิดรูพรุนของเมมเบรน ที่เรียกว่า cake - layer (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ซึ่งมีความสอดคล้องกับปัจจัยการเกิดการอุดตันที่ได้กล่าวข้างต้น เนื่องจากในน้ำทิ้งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ จุลินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ที่มีอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน ตั้งแต่ 0.2 – 130 μm จึงทำให้เกิดการอุดตันได้ทั้งแบบ pore narrowing pore plugging และ cake – layer แตกต่างกับงานวิจัยของกัลยา ศรีสุวรรณ (2542) ที่กรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ขนาดรูพรุน 0.45 เช่นกัน มีลักษณะการอุดตันเป็นแบบจำลอง SBM คือมีอนุภาคขนาดเล็กอุดตันในรูพรุนเมมเบรน แต่จะไม่เกิดเค้กบนผิวหน้า เนื่องมาจากน้ำทิ้งที่ใช้ในการกรองมีลักษณะสมบัติที่ดีกว่าน้ำทิ้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือจะมีค่าของแข็งแขวนลอย ค่าสี และซีโอดี เพียง 40 mg/L, 175 และ 480 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าน้ำทิ้งที่ใช้ในการวิจัยจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่า ทำให้สามารถเกิดการอุดตันเป็นชั้นเค้กบนผิวหน้า อีกทั้งเมื่อนำเมมเบรนมาถ่ายภาพผิวด้านบนและภาคตัดขวางด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 10,000 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ พบว่าผิวด้านบนของเมมเบรนไมโครฟิลเตรัชนสะอาด จะปรากฏรูพรุนที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.38 (a) และเมื่อผ่านการกรองน้ำทิ้งจะเห็นการอุดตันของอนุภาคที่ขนาดแตกต่างๆ บนผิวเมมเบรนอย่างหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (c) และในภาคตัดขวางจะมีการสะสมของอนุภาคในรูพรุนและบนผิวเมมเบรนเป็นเค้กอย่างชัดเจน มีความหนาประมาณ 3 - 4 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (d) ซึ่งเป็นการอุดตันแบบ pore narrowing pore plugging และcake layer เช่นเดียวกับลักษณะการอุดตันของแบบจำลอง CFM และหลังจากเมื่อนำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดด้วย HCl 0.1 N และ NaOH 0.1 N จะเห็นได้ว่าสามารถกำจัดการอุดตันแบบ cake - layer ที่อยู่บนผิวเมมเบรนออกได้เป็นส่วนใหญ่ แต่ยังหลงเหลืออนุภาคอยู่บนผิวและในรูพรุนของเมมเบรนอยู่บ้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (e, f)

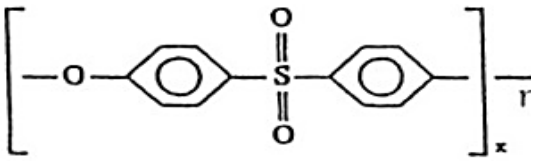


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง(a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM
ในการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar



รูปที่ 4.36 ภาพถ่าย SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน
surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้ง
(e) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด
cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (d) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้ง
(f) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด

จากรูปที่ 4.36 (c, d) เห็นได้ว่าการอุดตันบนผิวเมมเบรนมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำมาจำแนกธาตุบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่กรองน้ำทิ้งในเชิงคุณภาพ (quantitative) โดยใช้เทคนิค Energy – Dispersive X – ray spectroscopy (EDX) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาดจะตรวจพบธาตุในสัดส่วนที่เรียงจากมากไปหาน้อย คือ คาร์บอน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ เนื่องจากเมมเบรนผลิตจาก Polyethersulfone (PES) ประกอบด้วย phenylene rings ที่เชื่อมโยงพวกหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิล (SO_2) และ อีเทอร์ (- O -) ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rabiller - Baudry *et al*. (2012) และ Arkhangelsky *et al*. (2007) ที่พบธาตุดังกล่าวในเมมเบรนที่ผลิตจาก PES เช่นกัน และเมื่อนำเมมเบรนที่ผ่านการกรองน้ำทิ้งมาวิเคราะห์จะตรวจพบธาตุต่างๆ ในสัดส่วนเรียงจากมากไปหาน้อย คือ ออกซิเจน คาร์บอน ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม คลอรีน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชั้นเค้กที่หนาประมาณ 3 – 4 μm บนผิวเมมเบรน ดังรูปที่ 4.36 (c) นั่น จะประกอบด้วยธาตุที่สามารถตรวจพบได้ในน้ำเสียและน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม (Ahmad *et al*., 2006; Yejian *et al*., 2008) โดยธาตุเหล่านี้มีทั้งเป็นกลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งด้วยเทคนิค FTIR จะพบหมู่ฟังก์ชัน aromatic hydroxyl group, C=O stretching, aliphatic C-H bending, aromatic C-C stretching, C-O stretching และ C-H aromatic ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ในกลุ่มสารอินทรีย์พวกลิกนิน โพลีแซคคาไรด์ โปรตีนจากพืช และเฮมิเซลลูโลส ที่ทำให้เกิดสีในน้ำทิ้ง (Ahmad *et al*., 2008; Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010; Rakamthong and Prasertsan, 2011) เห็นได้ว่าหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้นจะประกอบด้วยคาร์บอน และออกซิเจนเป็นหลัก จึงจัดให้ธาตุทั้งสองเป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการอุดตันแบบ organic fouling ส่วนฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม คลอรีน และซัลเฟอร์ จัดให้เป็นกลุ่มสารอนินทรีย์ที่ทำให้เกิดการอุดตันแบบ scaling ซึ่งจากสัดส่วนที่ตรวจพบในตารางที่ 4.5 จะได้ว่าสัดส่วนของกลุ่มสารอินทรีย์ต่อกลุ่มสารอนินทรีย์ เท่ากับ 70.6 ต่อ 29.4 แสดงให้เห็นว่าชั้นเค้กบนเมมเบรนเกิดจากธาตุในกลุ่มสารอินทรีย์เป็นหลัก โดยธาตุเหล่านั้นจะเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดการอุดตันแบบ organic fouling



รูปที่ 4.37 องค์ประกอบของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ที่ผลิตจาก PES
ที่มา: satorius (2015)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แร่ธาตุในเชิงคุณภาพบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาดและเมมเบรนไมโครฟลิเตรชันที่ผ่านการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

แร่ธาตุ	ร้อยละของสัดส่วนที่ตรวจพบ	
	เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน	เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่กรองน้ำทิ้ง
คาร์บอน (C)	68.2	29.2
ออกซิเจน (O)	31.6	41.4
ซัลเฟอร์ (S)	0.2	0.2
ฟอสฟอรัส (P)	-	11.0
แมกนีเซียม (Mg)	-	9.5
ไนโตรเจน (N)	-	4.6
โพแทสเซียม (K)	-	1.6
แคลเซียม (Ca)	-	1.3
ซิลิกอน (Si)	-	0.6
อะลูมิเนียม (Al)	-	0.4
คลอรีน (Cl)	-	0.2
รวม	100	100

ต่อมาเป็นลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งเห็นได้ว่าการกรองผ่านเมมเบรนที่มีรูพรุน 0.45 μm สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ ส่วนสารอินทรีย์ละลายน้ำ และสารอนินทรีย์สามารถบำบัดได้เล็กน้อย อย่างเช่น ค่าสี UV_{254} และการนำไฟฟ้าที่สามารถบำบัดได้น้อยมาก เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนใหญ่จะที่มีขนาดเล็กกว่า 0.22 μm (Owen *et al*.,1993) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าจึงไม่สามารถกักกั้นได้ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กัลยา ศรีสุวรรณ (2542) ที่กรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.45 μm โดยน้ำทิ้งมีลักษณะสมบัติคือ ซีโอดี 480 mg/L ของแข็งแขวนลอย 40 mg/L และสี 175 พบว่าเมื่อนำมากรองผ่านไมโครฟิลเตรชันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 20 - 50 แต่บำบัดสีได้น้อยมาก และเมื่อเปลี่ยนเมมเบรนให้มีรูพรุนขนาดเล็กลงคือ 0.1 และ 0.22 μm ก็พบว่าไม่สามารถบำบัดสีได้ดีกว่าเดิม โดยในการกรองจะมีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 201.15 L/m^2-hr ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองนี้ เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะสมบัติที่ดีกว่าน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงสามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า เกิดการอุดตันที่ช้ากว่า งานวิจัยของ Majouli *et al*., (2012) ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.2 μm บำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกหนัง พบว่าสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และทีเคเอ็นได้ดี แต่สำหรับค่าการนำไฟฟ้าบำบัดได้เล็กน้อย จากเดิมที่น้ำทิ้งมีค่าการนำไฟฟ้า 22 mS/cm เมื่อกรองผ่านเมมเบรนจะมีค่าลดลงเหลือ 13 mS/cm งานวิจัยของ Yejian *et al*. (2008) ทำการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่มีค่าสี 200 color unit ค่าการนำไฟฟ้า 3,350 μS/cm ความขุ่น 111 NTU และของแข็งแขวนลอย 289.6 mg/L เมื่อผ่านการกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน MWCO 10,000

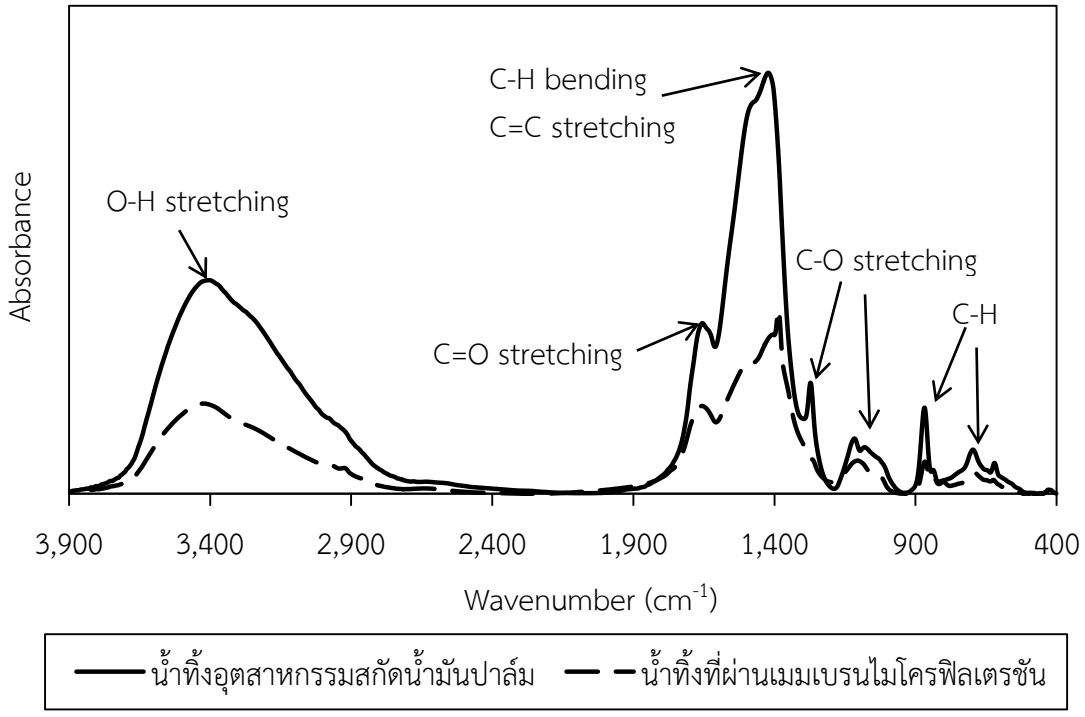
พบว่าน้ำทิ้งจะมีค่าสี การนำไฟฟ้า และความขุ่นหลงเหลือ 100 color unit, 3,350 µS/cm และ 0.79 NTU เห็นได้ว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ทำการทดลอง จะสามารถบำบัดสี และการนำไฟฟ้าได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับความขุ่น และของแข็งแขวนลอยที่จัดเป็นสารแขวนลอยไม่ละลายน้ำ อีกทั้งสอดคล้องกับคุณสมบัติของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเมมเบรนผลิตจาก PES ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) และมีขั้ว เมื่อกรองน้ำทิ้งที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) พวกหมู่ฟังก์ชัน aromatic เป็นส่วนใหญ่ (Edzwald and Benschoten, 1990; Swietlik and Sikorska, 2005; Owen *et al*., 1993) จึงเกิดการดูดซับและอุดตันอย่างหนาแน่นบนผิวเมมเบรน ในลักษณะของแบบจำลอง CFM ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (d) ทำให้สารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำจึงไม่สามารถผ่านไปได้ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยในน้ำทิ้งที่ผ่านการกรองจึงมีขนาดเล็ก ส่งผลทำให้ค่าความขุ่นลดลงด้วย ส่วนสารอินทรีย์กลุ่มที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) เช่น สี UV_{254} ค่าการนำไฟฟ้า จึงกำจัดออกได้ยาก เนื่องจากสามารถหลุดผ่านรูพรุนเมมเบรนได้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งกับน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	**ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย**	
	น้ำทิ้ง	**น้ำทิ้งที่กรองผ่านไมโครฟิลเตรชัน**
พีเอช	8.3 – 8.5	8.3
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	1.79
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 – 8	6.754
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	170 - 250	48
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	5,000 – 5,500	4,376
UV_{254} (cm^{-1})	10 - 12	9.45
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	1,604
ซีโอดี (mg/L)	900 – 1,300	592
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	548
ดีโอซี (mg/L)	180 - 220	189.1
ขนาดอนุภาค (µm)	21 – 22	0.03
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	5.0

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านไมโครฟิลเตรชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เห็นได้ว่ามีการลดลงของกลุ่มสารอินทรีย์ จึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อเปรียบเทียบพีคที่ตำแหน่งความถี่ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ระหว่างน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มและน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน โดยในการวิเคราะห์ได้ควบคุมปริมาณตัวอย่างและสารเคมีให้มีปริมาณเท่ากัน พบว่าในน้ำทิ้งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ของพวก aromatic hydroxyl group ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ของพวก carboxyl ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending

และ aromatic C-C stretching ความถี่ 1,272, 1,116 และ 1,080 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ของพวก carboxyl และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะปรากฏพีคในตำแหน่งเดียวกับน้ำทิ้ง แต่จะมีความสูงของพีคที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่า การกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ในบางส่วนเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดี และทีโอซี ที่วิเคราะห์ได้ในตารางที่ 4.6 แต่ในส่วนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปละลายน้ำ เช่น สี และ UV_{254} สามารถบำบัดได้น้อยได้ เนื่องจากในรูปที่ 4.38 น้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ตรวจพบหมู่ฟังก์ชันเดียวกับในน้ำทิ้ง ที่ส่งผลทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำทิ้ง ดังนั้นน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจึงยังคงมีสีน้ำตาล และค่าสีที่วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 4.6 จึงยังมีค่าสูงนั่นเอง



รูปที่ 4.38 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านไมโครฟิลเตรชัน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

4.4.2 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

จากการศึกษาการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันโดยตรงแล้ว จึงนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และรูปแบบการอุดตันกับน้ำทิ้งที่ผ่านบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อนเข้าสู่เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเลือกใช้สารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือ สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองบทที่ 4.2.1 ในการหาความเข้มข้นและพีเอชของสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิดในการบำบัดน้ำทิ้ง จึงเลือกใช้น้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันในสภาวะดังกล่าวมากรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ซึ่งในขั้นต้นได้นำมาหาค่า silt density index (SDI) ที่เป็นดัชนีบ่งชี้การอุดตันบนผิวเมมเบรน จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งมีการกำหนดค่า SDI สำหรับเมมเบรนรีเวิร์สออสโมซิสไว้คือ

- SDI < 1 สามารถทำการเดินระบบได้ในระยะเวลาหลายปี โดยไม่เกิด colloid fouling
- SDI < 3 สามารถทำการเดินระบบได้ในระยะเวลาหลายเดือน โดยต้องทำการล้างเมมเบรน
- SDI 3 – 5 จะเกิด particulate fouling และต้องทำการล้างบ่อยครั้ง
- SDI > 5 ควรจะทำการบำบัดขั้นต้น (Lenntech, 2014)

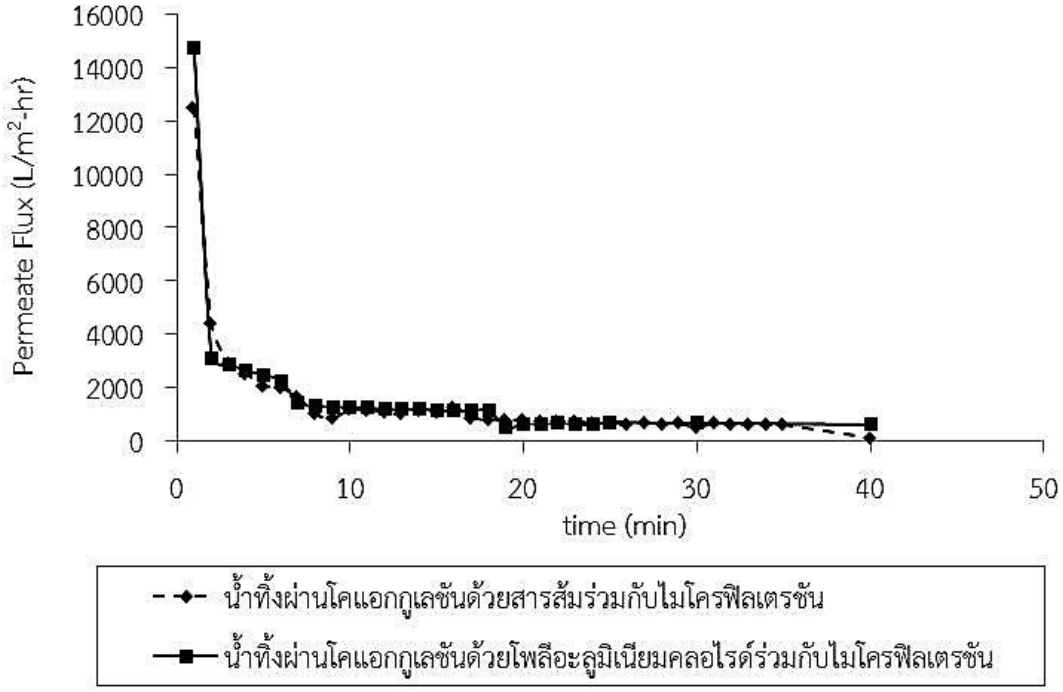
ตารางที่ 4.7 ค่า Silt density index (SDI) ของน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยกลไกทางกายภาพเคมี

น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน	Silt density index (SDI)
สารส้ม ความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5	5.14
โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5	5.09

จากตารางที่ 4.7 เห็นได้ว่าน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแอกกูเลชันยังไม่เหมาะที่จะนำเข้าเมมเบรนที่รูพรุนมีความหนาแน่นมากๆอย่างเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน หรือรีเวิร์สออสโมซิส ด้วยเหตุผลเรื่องการอุดตันจึงควรมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน โดยในการทดลองจะกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันชนิดเดียวกับการกรองน้ำทิ้ง คือผลิตจาก polyethersulfone (PES) มีรูพรุนขนาด 0.45 μm และเดินระบบเช่นเดียวกับการกรองน้ำทิ้งด้วย คือแบบ dead – end ที่ความดัน 1 bar ซึ่งเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยของน้ำกลั่น 21,441.7 L/m^2-hr และมีความต้านทานของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (R_m) เท่ากับ $1.87 \times 10^{10} m^{-1}$ คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.2) เมื่อกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 ผ่านเมมเบรน พบว่า ในนาทีที่ 2 ค่าฟลักซ์จะลดลงมากกว่าร้อยละ 60 โดยได้ทำการกรองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 40 min สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ปริมาตรประมาณ 1,141 mL มีค่าฟลักซ์ลดลงเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ย 1,413.45 L/m^2-hr ดังแสดงในรูปที่ 4.39 หลังจากนั้นจึงนำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาด แล้วกรองด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง พบว่ามีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 19,514.18 L/m^2-hr เมื่อนำมาคำนวณหาความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง

เท่ากับ 2.05×10^{10} m^{-1} คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.3) ดังนั้น เมมเบรนจะมีความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f) เท่ากับ 1.85×10^9 m^{-1} คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.4) และความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance, R_p) เท่ากับ $2.63 \times 10^{11} m^{-1}$ คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.5) โดยค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงของการทดลองควรมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากในสมการที่ (4.5) ได้แทนด้วยค่าความหนืดค่าของน้ำกลั่น ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่ผ่านบำบัดด้วยการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม ดังนั้นค่าความต้านทานรวมในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยการโคแอกกูเลชันโดยสารส้มผ่านเมมเบรนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้ และทำให้ค่าความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้เช่นกัน

ส่วนน้ำทิ้งที่บำบัดโดยการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 เมื่อกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีค่าฟลักซ์เฉลี่ยของน้ำกลั่น 21,458 L/m^2-hr และมีความต้านทานของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (R_m) เท่ากับ 1.87×10^{10} m^{-1} พบว่า ในนาทีที่ 2 ค่าฟลักซ์จะลดลงมากกว่าร้อยละ 60 เช่นเดียวกับการใช้สารส้ม โดยทำการกรองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 40 min จะสามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ปริมาตรประมาณ 1,112 mL มีค่าฟลักซ์ลดลงเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ย 1,784.1 L/m^2-hr ดังแสดงในรูปที่ 4.39 หลังจากนั้นได้นำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาด แล้วกรองด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง พบว่ามีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 20,540.11 L/m^2-hr เมื่อนำมาคำนวณหาความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงเท่ากับ $1.95 \times 10^{10} m^{-1}$ ดังนั้น เมมเบรนจะมีความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f) เท่ากับ 0.84×10^9 m^{-1} และความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance; R_p) เท่ากับ $2.05 \times 10^{11} m^{-1}$ โดยค่าความต้านทานที่ภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันของการทดลองควรมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากในสมการที่ (4.5) ได้แทนด้วยค่าความหนืดค่าของน้ำกลั่น ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยการโคแอกกูเลชันโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ดังนั้นค่าความต้านทานรวมในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยการโคแอกกูเลชันโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ผ่านเมมเบรนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้ และทำให้ค่าความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้เช่นกัน



รูปที่ 4.39 ค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar กับเวลา

ตารางที่ 4.8 ค่าฟลักซ์และความต้านทานที่เกิดจากฟาวลิงของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	**ค่าฟลักซ์เฉลี่ย (L/m^2-hr)**	**ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (m^{-1})**	**ความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (m^{-1})**
POME + Alum +MF	1,413.45	1.85×10^9	2.63×10^{11}
POME + PACl +MF	1,784.1	0.84×10^9	2.05×10^{11}

หมายเหตุ POME + Alum + MF คือน้ำทิ้งที่บำบัดโดยการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

POME + PACl + MF คือน้ำทิ้งที่บำบัดโดยการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

จากตารางที่ 4.8 เห็นได้ว่าน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยการโคแอกกูเลชันแล้วกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงและความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันต่ำกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง ส่งผลทำให้ฟลักซ์มีค่าสูงกว่า และสามารถกรองได้ระยะเวลานานขึ้น สอดคล้องกับตารางที่ 4.2 ที่พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในบำบัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์พวกไม่ละลายและละลายน้ำ สารอนินทรีย์ และมีอนุภาคเฉลี่ยที่หลงเหลืออยู่

ขนาดเล็กกว่าในน้ำทิ้ง จึงทำให้เกิดการอุดตันที่ช้ากว่า ซึ่งจากตารางที่ 4.8 น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม จะมีค่าความต้านทานที่สูงกว่า และฟลักซ์ต่ำกว่าการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al*. (2008) ที่พบว่าในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะทำให้เกิดการอุดตันแบบ cake – layer และมีค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงสูงเมื่อเทียบกับการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ งานวิจัยของ Abdelrasoul *et al*. (2013) พบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถลดการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling) ได้ แต่อนุภาคขนาดเล็กที่ไม่สามารถกำจัดได้ จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเกิดฟาวลิง (irreversible fouling) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ทำการวิเคราะห์ในบทที่ 4.2.2 และ 4.2.3 พบว่ามีปัจจัยที่ทำให้เกิดการอุดตัน ดังนี้

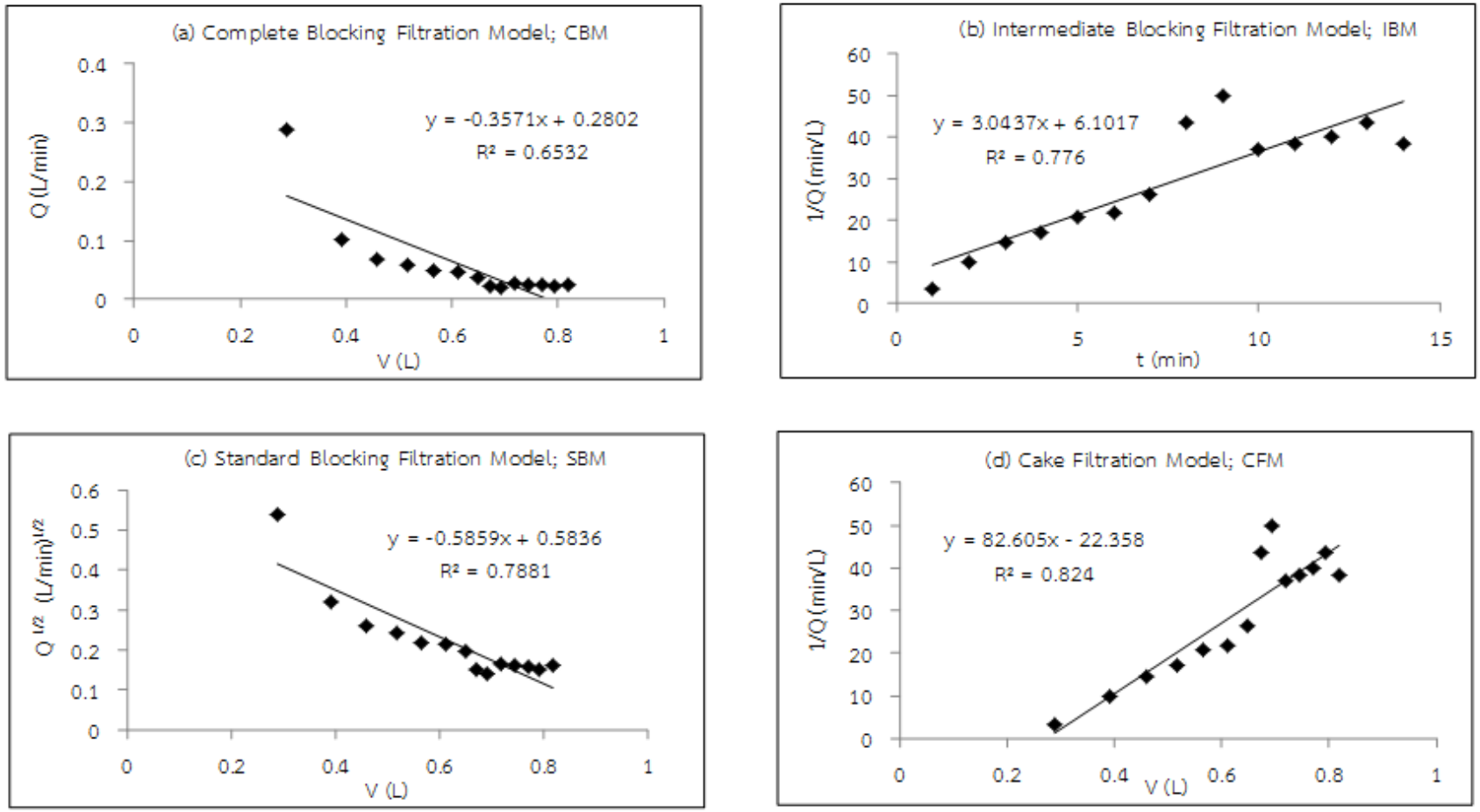
1) Particulate / Colloid fouling เกิดจากของแข็งแขวนลอย อนุภาคคอลลอยด์ และของแข็งละลายน้ำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า มีขนาดอนุภาคที่หลากหลาย โดยมีขนาดเฉลี่ย 3.4 และ 4.4 μm ตามลำดับ ดังนั้นหากใช้แรงดันขับเคลื่อนน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.45 μm จะทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนอุดตันบนผิวด้านบนของเมมเบรน เกิดเป็น cake – Layer และอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะไปอุดตันในรูพรุน ที่เรียกว่า pore plugging ได้เช่นกัน (Franken, 2009)
2) Organic fouling เกิดจากกลุ่มสารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter; NOM) ซึ่งจากการวิเคราะห์ทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่ามีค่าสารอินทรีย์ในรูป สี UV_{254} ซีโอดี ทีโอซี และดีโอซีที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้ง และเมื่อคำนวณค่า SUVA จะอยู่ในช่วง 2 – 4 L/mg-m จัดเป็นสารอินทรีย์ทั้งประเภทละลายและไม่ละลายน้ำ (Pernitsky and Edzwald, 2006) ดังนั้นเมื่อกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะเกิด การอุดตันในรูปแบบเช่นเดียวกับน้ำทิ้ง คือ pore plugging และ cake – layer ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะอาศัยการดูดซับ ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวและรูพรุนของเมมเบรนแบบ gel – layer และ pore narrowing (Holman and Ohlinger, 2007) แต่จะเกิดการอุดตันที่ช้ากว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง ทำให้เดินระบบได้นานขึ้น เนื่องจากฟาวลิงประเภทนี้สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Franken, 2009)
3) Inorganic / Scaling เกิดจากสารอนินทรีย์ โลหะไฮดรอกไซด์ และพวกคาร์บอเนต ที่สะสมบนผิวหรือรูพรุนของเมมเบรน ไอออนหลักๆที่ทำให้เกิด scaling คือ แคลเซียม แมกนีเซียม ไบคาร์บอเนต ซัลเฟต ซิลิกา เหล็ก และแบเรียม (Franken, 2009) ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าพีเอช และค่าความเป็นด่างในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่ามีค่าต่ำกว่าในน้ำทิ้ง ส่วนค่าการนำไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับน้ำทิ้ง อาจเนื่องมาจากมีการหลงเหลือของอะลูมิเนียมจากสารสร้างตะกอนที่เติมลงไป จึงทำให้เกิดฟาวลิงประเภทนี้ได้

จากปัจจัยต่างๆในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน สามารถทำให้เกิดการอุดตันทั้งในรูพรุนและบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จึงนำมาอธิบายด้วยแบบจำลองการอุดตันของ Hermia (1952) โดยการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.41 พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด คือ แบบจำลอง Cake Filtration Model (CFM) ที่มีค่า r^2 = 0.82 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (d) ซึ่งแบบจำลอง CFM สามารถอธิบายได้ว่าการกรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีลักษณะการอุดตันส่วนใหญ่ เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุน ถูกดูดซับและอุดตันอยู่ภายในรูพรุนของเมมเบรน จนมีการซ้อนทับกันบนผิวเมมเบรน เรียกว่า pore narrowing และ pore plugging ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคอย่างหนาแน่นเป็นเค้กบนผิวหน้าและปิดรูพรุนของเมมเบรน ที่เรียกว่า cake - layer (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ซึ่งจากปัจจัยของน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มสำหรับการเกิดการอุดตันที่ได้กล่าวข้างต้นนั้น เห็นได้ว่าจะประกอบด้วยอนุภาคของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่ผสมกัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 3.4 μm จึงสามารถเกิดการอุดตันได้ทั้งแบบ pore narrowing pore plugging และ cake – layer อีกทั้งเมื่อนำมาเมมเบรนมาถ่ายภาพผิวด้านบนและภาคตัดขวางด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 10,000 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ เพื่อดูรูปแบบการอุดตัน พบว่าผิวด้านบนของเมมเบรนสะอาดก่อนการกรอง จะปรากฏรูพรุนที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (a) ส่วนเมื่อผ่านการกรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มจะเห็นการอุดตันของอนุภาคที่ขนาดเล็กซ้อนทับอยู่บนผิวของเมมเบรนอย่างหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (c) และในภาคตัดขวางจะมีการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรนเป็นเค้กอย่างชัดเจน ซึ่งหนาประมาณ 6 – 7 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (d) จัดว่าเป็นการอุดตันแบบ cake – layer ซึ่งเป็นลักษณะการอุดตันของแบบจำลอง CFM และหลังจากเมื่อนำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดด้วย HCl 0.1 N และ NaOH 0.1 N จะเห็นได้ว่าสามารถกำจัดการอุดตันแบบ cake – layer ที่อยู่บนผิวเมมเบรนออกได้เป็นส่วนใหญ่ แต่จะหลงเหลืออนุภาคที่อุดตันอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.36 (e, f) จากแบบจำลองการอุดตันของการกรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่าเป็นลักษณะเดียวกันกับการกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนโดยตรง แต่จะเป็นการอุดตันของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (c) เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ ทำให้การกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มมีค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า และเดินระบบได้นานกว่าการกรองน้ำทิ้งนั่นเอง

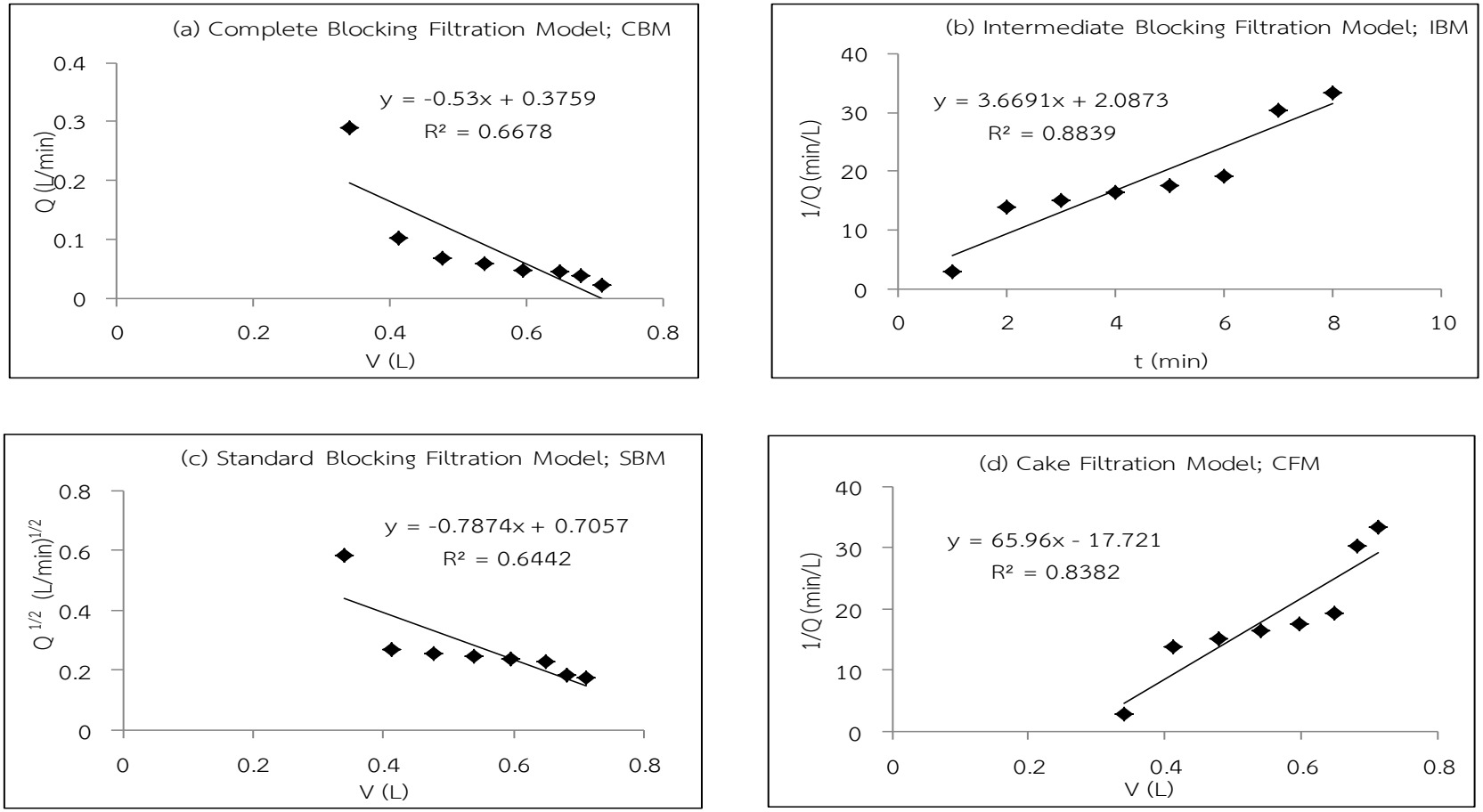
ส่วนการบำบัดน้ำทิ้งโดยการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 ร่วมกับเมมเบรน จะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด คือ แบบจำลอง Intermediate Blocking Filtration Model (IBM) ที่มีค่า r^2 = 0.88 ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (b) ซึ่งแบบจำลอง IBM สามารถอธิบายได้ว่าการกรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีลักษณะการอุดตันส่วนใหญ่ เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุน ถูกดูดซับและอุดตันอยู่ภายในรูพรุนของเมมเบรนจนมีการซ้อนทับกันบนผิวเมมเบรน เรียกว่า pore narrowing และ pore plugging แต่จะไม่เกิดการสะสมของอนุภาคอย่างหนาแน่นเป็นเค้กบนผิวหน้า

และปิดรูพรุนของเมมเบรน ที่เรียกว่า cake layer (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ซึ่งจากปัจจัยของน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สำหรับการเกิดการอุดตันที่ได้กล่าวข้างต้นนั้น เห็นได้ว่าจะประกอบด้วยอนุภาคของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่ผสมกัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 3.1 μm จึงสามารถเกิดการอุดตันได้ทั้งแบบ pore narrowing และ pore plugging และ cake – layer เช่นเดียวกับน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม แต่การใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถบำบัดอนุภาคขนาดใหญ่พวกของแข็งแขวนลอย กลุ่มสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำได้ดีกว่าสารส้มเล็กน้อย และมีการหลงเหลือของอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณที่น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.43 จึงทำให้เกิดการอุดตันจากอนุภาคขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งเมื่อนำมาเมมเบรนมาถ่ายภาพผิวด้านบนและภาคตัดขวางด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 10,000 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ เพื่อดูรูปแบบการอุดตัน พบว่าผิวด้านบนของเมมเบรนสะอาดก่อนการกรอง จะปรากฏรูพรุนที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (a) เมื่อผ่านการกรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะเห็นอนุภาคที่ขนาดเล็กอุดตันและถูกดูดซับอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.43 (a, b) ในกำลังขยายที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (c, d) จัดว่าเป็นการอุดตันแบบ pore plugging ซึ่งเป็นลักษณะการอุดตันของแบบจำลอง IBM และหลังจากเมื่อนำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดด้วย HCl 0.1 N และ NaOH 0.1 N จะเห็นได้ว่าสามารถกำจัดการอุดตันแบบ pore plugging ที่อยู่ในรูพรุนของเมมเบรนออกได้ แต่ยังคงหลงเหลืออนุภาคที่อุดตันอยู่บ้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (e, f)

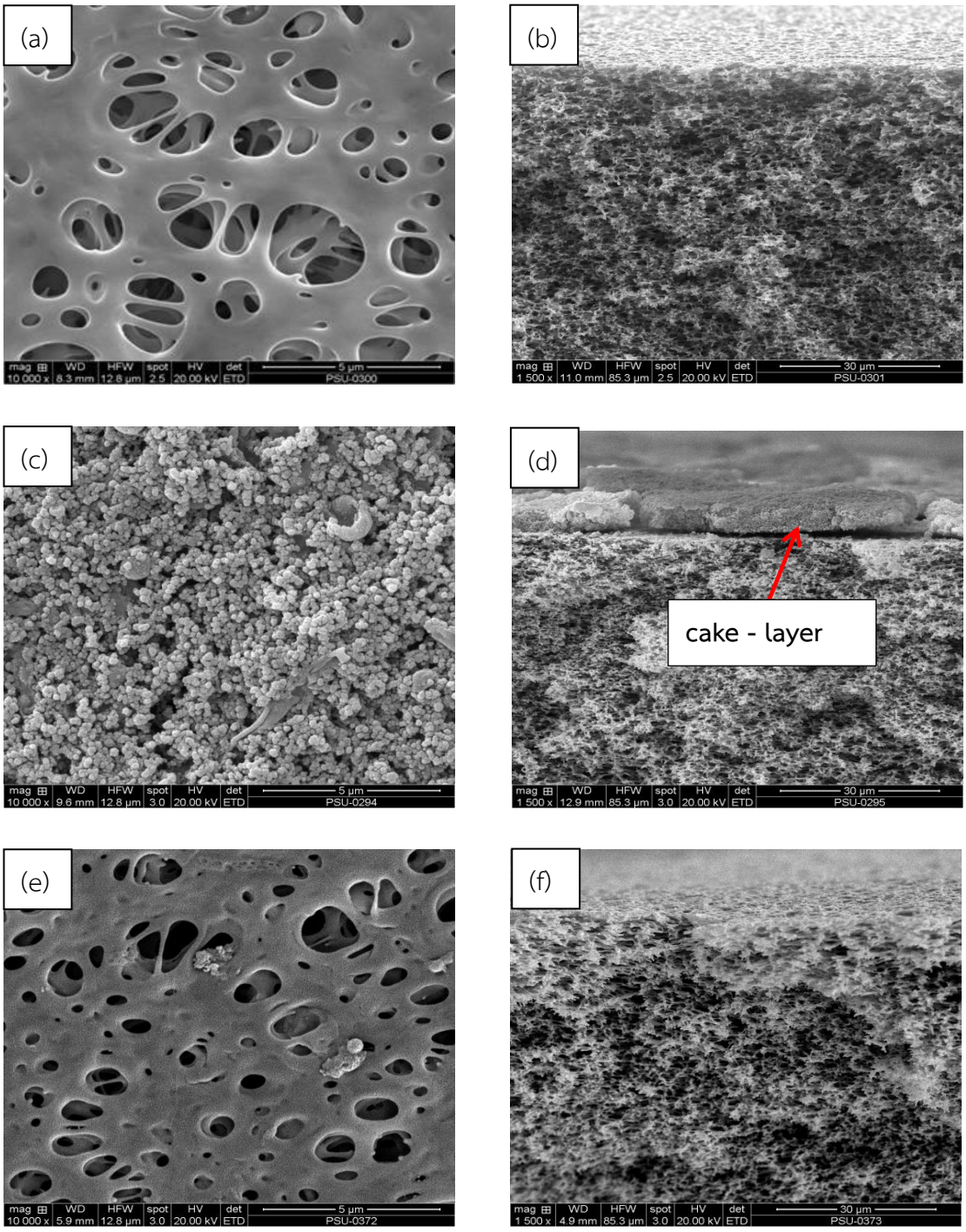
ดังนั้นการอุดตันของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันในการกรองที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม จะมีลักษณะการอุดตันแบบ cake – layer คือมีการอุดตันของอนุภาคขนาดเล็กในรูพรุนและมีอนุภาคขนาดใหญ่ซ้อนทับ สะสมอยู่บนผิวหน้าเมมเบรนอย่างหนาแน่นจนเป็นชั้นเค้ก ส่วนการกรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ผ่านเมมเบรน จะมีลักษณะการอุดตันแบบ pore narrowing และ pore plugging คือมีการอุดตันของอนุภาคขนาดเล็กในรูพรุนและบนผิวเมมเบรน แต่จะไม่สะสมเป็นชั้นเค้ก ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าฟลักซ์ และความต้านทานเนื่องจากการเกิดจากฟาวลิง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เนื่องจากน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรน จะมีค่าความต้านทานที่ต่ำกว่า ส่งผลทำให้มีค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันโดยสารส้มร่วมกับเมมเบรน แสดงให้เห็นว่าการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ สามารถควบคุมการอุดตันและฟาวลิงที่จะเกิดขึ้นในการกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันได้ สอดคล้องกับ Spinette (2008) ที่ได้อธิบายว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันจะทำให้ SUVA มีค่าลดลง ซึ่งช่วยลดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นในการกรองผ่านเมมเบรนได้



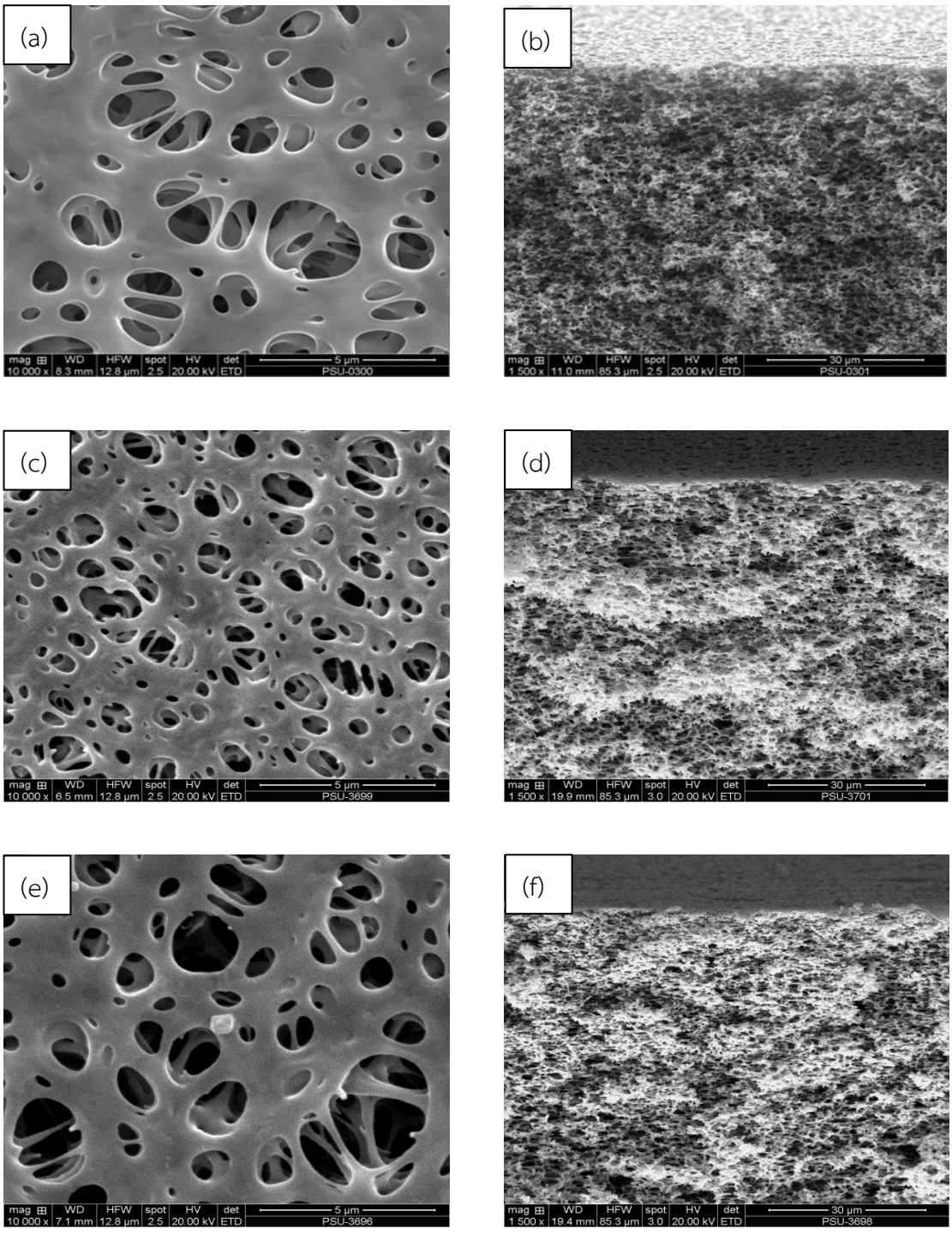
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง (a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM
ในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง (a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM ในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar



รูปที่ 4.42 ผล SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน
surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ
โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (e) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด
cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (d) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ
โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (f) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด



รูปที่ 4.43 ผล SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน
surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ
โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (e) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด
cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (d) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการ
โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (f) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด

จากรูปที่ 4.42 (c, d) แสดงให้เห็นถึงการอุดตันของอนุภาคขนาดเล็กอย่างหนาแน่นบนผิวเมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม จึงนำมาจำแนกธาตุบนผิวเมมเบรนในเชิงคุณภาพ (quantitative) ด้วยเทคนิค EDX จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาดจะตรวจพบธาตุในสัดส่วนที่เรียงจากมากไปหาน้อย คือ คาร์บอน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ เนื่องจากเมมเบรนผลิตจาก Polyethersulfone (PES) ประกอบด้วย phenylene rings ที่เชื่อมโยงพวกหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิล (SO_2) และ อีเทอร์ (- O -) ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rabiller – Baudry *et al*. (2012) และ Arkhangelsky *et al*. (2007) ที่พบธาตุดังกล่าวในเมมเบรนที่ผลิตจาก PES เช่นกัน และเมื่อนำเมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม มาวิเคราะห์จะตรวจพบธาตุต่างๆ ในสัดส่วนเรียงจากมากไปหาน้อย คือ ออกซิเจน คาร์บอน ซิลิกอน อะลูมิเนียม โพแทสเซียม ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน คลอรีน แมกนีเซียม แคลเซียม และฟอสฟอรัส ตามลำดับ ซึ่งพบธาตุประเภทเดียวกับที่วิเคราะห์ได้จากเมมเบรนที่กรองน้ำทิ้ง โดยมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน แต่ไม่สามารถนำมาเทียบเป็นปริมาณได้ ซึ่งจากการิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ในน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม จะปรากฏพีคต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่หมู่ฟังก์ชัน C=O stretching และ C-H aliphatic bending แต่จะปรากฏพีคสูงกว่าในน้ำทิ้ง บริเวณตำแหน่งเดียวกับหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบได้ในสารส้ม คือพวกหมู่ฟังก์ชัน O–H, Al–OH และ A–O (Contreras *et al*., 2006; Wang *et al*., 2013) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จึงจัดให้ธาตุคาร์บอน และออกซิเจนที่ตรวจพบเป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิด organic fouling ส่วนธาตุอื่นๆที่ตรวจพบให้จัดเป็นสารอนินทรีย์ที่ทำให้เกิด scaling ซึ่งจากตารางที่ 4.9 จะได้สัดส่วนของกลุ่มสารอินทรีย์ต่อกลุ่มสารอนินทรีย์ เท่ากับ 71.5 ต่อ 28.5 แสดงให้เห็นว่าชั้นเค้กบนผิวเมมเบรนเกิดจากธาตุในกลุ่มสารอินทรีย์เป็นหลัก โดยธาตุเหล่านี้จะมีขนาดอะตอมที่เล็กกว่ารูพรุนจึงทำให้สามารถหลุดผ่านหรือดูดซับอยู่ในรูพรุนของเมมเบรนไปได้ ดังงานวิจัยของ Ahmad *et al.* (2006) ที่บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง พบว่าน้ำที่ผ่านเมมเบรนจะมีธาตุดังกล่าวหลงเหลืออยู่ แต่ต่ำกว่าน้ำเสียที่โคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียว แสดงเห็นว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันก็ไม่สามารถกักกันธาตุเหล่านี้ได้ทั้งหมด และเมื่อธาตุต่างๆมีการเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้มีการอุดตันบนผิวเมมเบรนนั้นเอง และงานวิจัยของ Gabelich *et al*. (2002) พบว่าการบำบัดน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มที่มากเกินพอ ก่อนเข้าสู่เมมเบรน จะสามารถตรวจพบอะลูมิเนียม และฟอสฟอรัสบนผิวเมมเบรนได้

ส่วนเมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มาวิเคราะห์จะตรวจพบธาตุต่างๆ ในสัดส่วนเรียงจากมากไปหาน้อย คือ คาร์บอน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ อะลูมิเนียม คลอรีน และซิลิกอน ตามลำดับ เห็นได้ว่าจะไม่พบธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และเหล็ก เนื่องจากคุณสมบัติของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้สูงกว่าสารส้ม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และเนื่องจากเมมเบรนไม่เกิดการอุดตันบนผิวหน้าอย่างหนาแน่น กลุ่มธาตุที่ไม่พบจึงอาจดูดซับอยู่ในรูพรุนของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์น้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ด้วยเทคนิค FTIR จะปรากฏพีคต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่หมู่ฟังก์ชัน C=O stretching, C-H aliphatic bending, C-C aromatic

stretching และ C-O stretching แต่จะปรากฏพีคสูงกว่าในน้ำทิ้ง บริเวณตำแหน่งเดียวกับหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบได้ในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ คือพวกหมู่ฟังก์ชัน Al–OH–Al และ OH – bending (Mclnture *et al*., 1981) จึงจัดให้ธาตุคาร์บอน และออกซิเจนเป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิด organic fouling ส่วนธาตุซัลเฟอร์ อะลูมิเนียม คลอรีนและซิลิกอน ที่ตรวจพบให้จัดเป็นสารอนินทรีย์ที่ทำให้เกิด scaling ซึ่งจากตารางที่ 4.9 จะได้สัดส่วนของกลุ่มสารอินทรีย์ต่อกลุ่มสารอนินทรีย์ เท่ากับ 95.7 ต่อ 4.3 และเมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (c, d) เห็นได้ว่าเมมเบรนเกิดการอุดตันแบบ pore narrowing และ pore plugging โดยไม่เกิดเป็น cake – layer การใช้เทคนิค EDX ในการวิเคราะห์ธาตุ จึงมีบางส่วนที่เกิดจากธาตุบนผิวเมมเบรน นั่นคือ คาร์บอน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ทำให้ไม่สามารถกล่าวได้ว่าการอุดตันบนผิวเมมเบรนเกิดจากสารอินทรีย์เป็นหลัก

ตารางที่ 4.9 แร่ธาตุบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่กรองน้ำทิ้ง และน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน

แร่ธาตุ	**ร้อยละของสัดส่วนที่ตรวจพบบนเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน**		
	เมมเบรน	**กรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม**	**กรองน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์**
คาร์บอน (C)	68.2	24	64.3
ออกซิเจน (O)	31.6	47.5	31.4
ซัลเฟอร์ (S)	0.2	2.6	3.4
ฟอสฟอรัส (P)	-	0.2	-
แมกนีเซียม (Mg)	-	0.9	-
ไนโตรเจน (N)	-	2.5	-
โพแทสเซียม (K)	-	2.8	-
แคลเซียม (Ca)	-	0.5	-
ซิลิกอน (Si)	-	9.5	0.1
อะลูมิเนียม (Al)	-	8.6	0.5
คลอรีน (Cl)	-	0.9	0.3
รวม	100	100	100

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย		
	น้ำทิ้ง	น้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม	น้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน
พีเอช	8.3 – 8.5	5.5	5.1
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	3.1	0.595
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 – 8	7.032	6.287
ของแข็งแขวนลอย	170 -250	21	-
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	5,000 – 5,500	4,613	4,295
UV_{254} (cm^{-1})	10 – 12	2.27	2.02
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	270	249
ซีโอดี (mg/L)	900 – 1,300	236.06	192
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	168.5	148
ดีโอซี (mg/L)	180 – 220	68.52	62.81
ขนาดอนุภาค (µm)	21 – 22	3.4	< 0.001
ดัชนีตะกอน	-	5.14	2.51
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	3.31	3.21

ต่อมาเป็นลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 เห็นได้ว่าบำบัดของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ EDX ที่พบธาตุในกลุ่มสารอินทรีย์บนผิวเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนสารอินทรีย์ละลายน้ำ และสารอนินทรีย์สามารถบำบัดได้เล็กน้อย อย่างเช่น ค่าสี UV_{254} และการนำไฟฟ้าที่สามารถบำบัดได้น้อยมาก เช่นเดียวกับการกรองน้ำทิ้ง เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนใหญ่จะที่มีขนาดเล็กกว่า 0.22 µm (Owen *et al*.,1993) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าจึงไม่สามารถกักกั้นได้ทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กัลยา ศรีสุวรรณ (2542) ที่กรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.45 µm โดยน้ำทิ้งมีลักษณะสมบัติคือ ค่าซีโอดี 480 mg/L ของแข็งแขวนลอย 40 mg/L และสี 175 พบว่าเมื่อนำมากรองผ่านไมโครฟิลเตรชันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 20 – 50 แต่บำบัดสีได้น้อยมาก และเมื่อเปลี่ยนเมมเบรนให้มีรูพรุนขนาดเล็กลงคือ 0.1 และ 0.22 µm ก็พบว่าไม่สามารถบำบัดสีได้ดีกว่าเดิม โดยในการกรองจะมีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 201.15 L/m^2-hr ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองนี้ เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะสมบัติที่ดีกว่าน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงสามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า เกิดการอุดตันที่ช้ากว่า งานวิจัยของ Majouli *et al*., (2012) ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.2 µm บำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกหนัง พบว่าสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และทีเคเอ็นได้ดี แต่

สำหรับค่าการนำไฟฟ้าบำบัดได้เล็กน้อย จากเดิมที่น้ำทิ้งมีค่าการนำไฟฟ้า 22 mS/cm เมื่อกรองผ่านเมมเบรนจะมีค่าลดลงเหลือ 13 mS/cm งานวิจัยของ Yejian *et al*. (2008) ทำการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่มีค่าสี 200 color unit ค่าการนำไฟฟ้า 3,350 µS/cm ความขุ่น 111 NTU และของแข็งแขวนลอย 289.6 mg/L เมื่อผ่านการกรองผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน MWCO 10,000 พบว่าน้ำทิ้งจะมีค่าสี การนำไฟฟ้า ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยหลงเหลือ 100 color unit, 3,350 µS/cm, 0.79 NTU และไม่พบของแข็งแขวนลอย

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

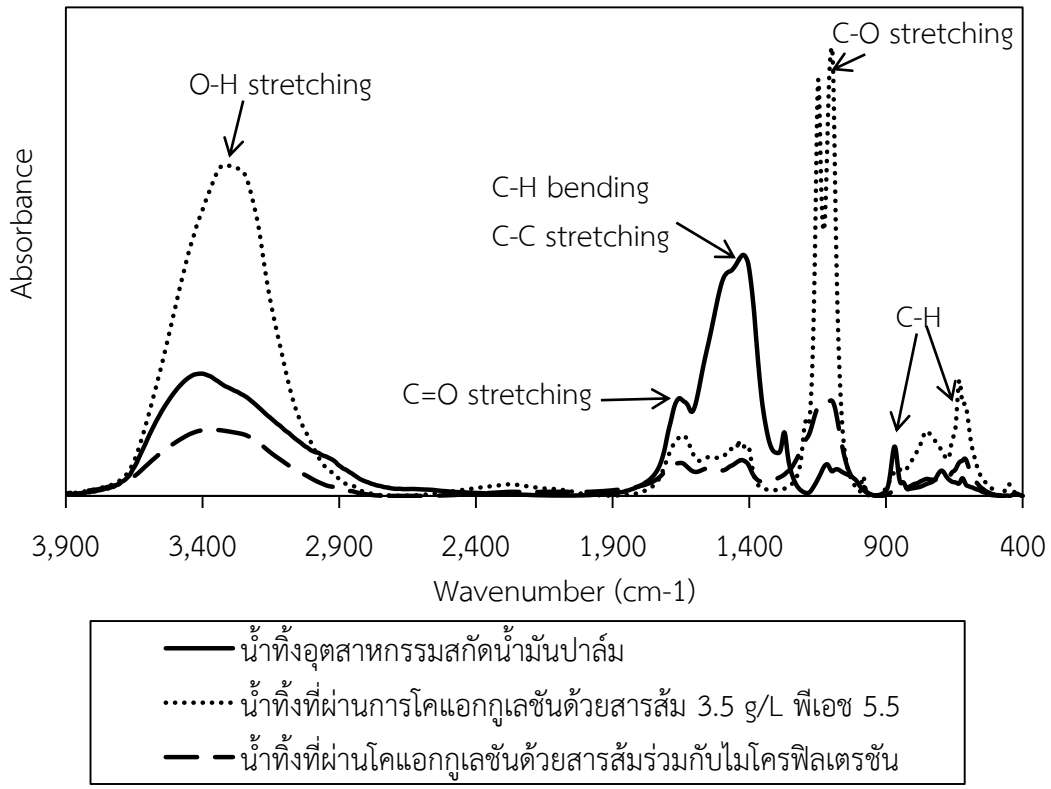
ดัชนีคุณภาพน้ำ	**ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย**		
	น้ำทิ้ง	**น้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์**	**น้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน**
พีเอช	8.3 – 8.5	6.5	5.9
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	3.05	0.581
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 – 8	7.078	6.231
ของแข็งแขวนลอย	170 – 250	20	-
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	5,000 – 5,500	4,536	4,270
UV_{254} (cm^{-1})	10 -12	2.24	1.99
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	209	196
ซีโอดี (mg/L)	900 – 1,300	209.83	185
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	163.8	137
ดีโอซี (mg/L)	180 – 220	67.46	60.4
ขนาดอนุภาค (µm)	21 – 22	3.1	< 0.001
ดัชนีตะกอน	-	5.09	2.39
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	3.32	3.3

และงานวิจัยของ Wang *et al*. (2013) ใช้การโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ จะมีค่าความขุ่นและ UV_{254} หลงเหลืออยู่ 1.52 NTU และ 0.05 cm^{-1} เมื่อนำมาบำบัดต่อด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน จะมีค่าความขุ่นและ UV_{254} หลงเหลืออยู่ 0.22 NTU และ 0.02 cm^{-1} เห็นได้ว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ทำการทดลองจะสามารถบำบัดสี UV_{254} และการนำไฟฟ้าได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับความขุ่น และของแข็งแขวนลอยที่จัดเป็นสารแขวนลอยไม่ละลายน้ำ อีกทั้งสอดคล้องกับคุณสมบัติของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเมมเบรนผลิตจาก PES ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) และมีขั้ว เมื่อกรองน้ำทิ้งผ่านการโคแอกกูเลชันที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภท humic และ fulvic ทั้งพวกชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) (Edzwald and Benschoten, 1990) จึงทำ

ให้สารอินทรีย์พวกไม่ชอบน้ำเกิดการอุดตันบนผิวเมมเบรนไม่สามารถผ่านไปได้ โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เมื่อกรองผ่านเมมเบรนจะมีรูปแบบการอุดตันแบบ CFM และ IBM ตามลำดับ ซึ่งรุปแบบทั้งสองเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุน ถูกดูดซับและอุดตันอยู่ภายในรูพรุนของเมมเบรนจนมีการซ้อนทับกันบนผิวเมมเบรน เพียงแต่แบบจำลอง IBM จะไม่สะสมอนุภาคจนเป็นชั้น cake การกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันจึงสามารถที่จะทำให้ค่าความขุ่นลดลงและอนุภาคที่ตรวจพบมีขนาดเล็กได้ ส่วนพวกชอบน้ำ (hydrophilic) เช่น สี UV_{254} ค่าการนำไฟฟ้า จึงกำจัดออกได้ยาก เนื่องจากสามารถหลุดผ่านรูพรุนเมมเบรน ซึ่งในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันจะพบสารอินทรีย์พวกไม่ชอบน้ำน้อยกว่าในน้ำทิ้ง ทำให้เกิดอุดตันบนผิวเมมเบรนที่ช้ากว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง สอดคล้องกับตารางที่ 4.8 ดังนั้นค่าสี UV_{254} และค่าการนำไฟฟ้า ที่อยู่ในรูปละลายน้ำจึงกำจัดออกได้ยาก และเมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีตะกอน (SDI) เห็นได้ว่าน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะมีค่า SDI น้อยกว่า 3 แสดงถึงความสามารถในการเดินระบบได้ในระยะเวลาหลายเดือน โดยต้องทำการล้างเมมเบรน (Lenntech, 2014)

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนดังแสดงในตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 เห็นได้ว่ามีการลดลงของกลุ่มสารอินทรีย์ จึงนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ ด้วยเทคนิค FTIR เพื่อเปรียบเทียบพีคที่ตำแหน่งความถี่ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ระหว่างน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน โดยในการวิเคราะห์ได้ควบคุมปริมาณตัวอย่างและสารเคมีให้มีปริมาณเท่ากัน พบว่าในน้ำทิ้งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic hydroxyl group (O-H stretching) ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aliphatic C-H bending และ aromatic C-C stretching ความถี่ 1,272, 1,116 และ 1,080 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ส่วนน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L ควบคุมพีเอช 5.5 จะปรากฏพีคต่ำกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 1,642 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,431 cm^{-1} ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H aliphatic bending แต่จะปรากฏพีคที่สูงกว่าน้ำทิ้งในบริเวณตำแหน่งความถี่ 3,400, 1,100 และ 600 cm^{-1} ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Contreras *et al*. (2006) ที่ทำการวิเคราะห์ FTIR ของอะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้มละลายน้ำจะพบพีคสูงที่ตำแหน่งความถี่ 3,000 – 3,700, 1,655, 1,135, 998 และ 613 cm^{-1} และงานวิจัยของ Wang *et al*. (2013) จะพบพีคสูงที่ตำแหน่งความถี่ 3,435 และ 1,645 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน O – H ความถี่ 1,125 และ 982 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันของ Al – OH และความถี่ 610 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันของ Al – O ซึ่งเห็นได้ว่าจะพบตำแหน่งของพีคที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของพีคที่สูงขึ้นในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม จึงอาจกล่าวได้ตำแหน่งที่ปรากฏพีคสูงกว่าน้ำทิ้งนั้นเกิดจากการหลงเหลือของสารส้มที่เติมลงไป และเมื่อวิเคราะห์ FTIR ในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะปรากฏพีคที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่โคแอกูเลชันด้วยสารส้มเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.44 แต่ที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} อาจปรากฏพีคที่

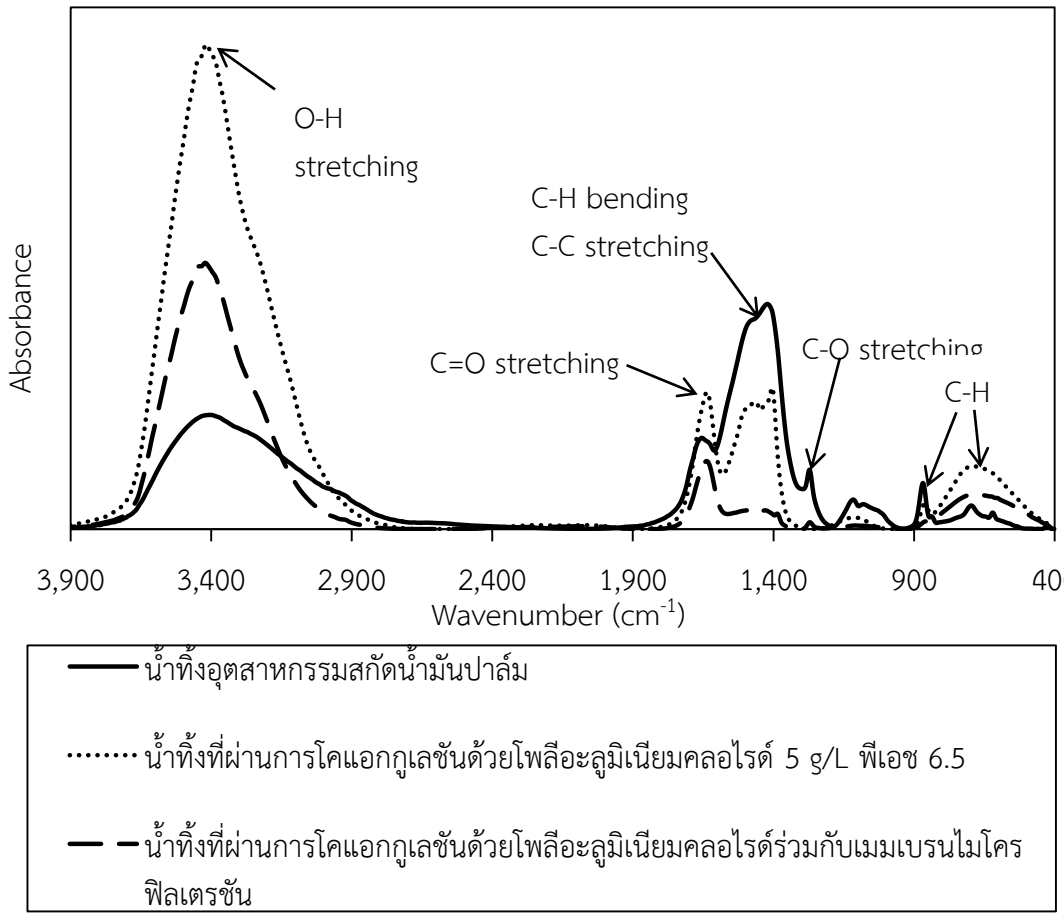
คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างอาจสัมผัสกับอากาศและความชื้น ดังนั้นการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม สามารถบำบัดกลุ่มสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีในน้ำทิ้ง และสารที่หลงเหลือจากการเติมสารส้มได้ สอดคล้องกับตารางที่ 4.10 ที่การบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย และทำให้ค่าสีลดลง อีกทั้งจากผล EDX จะพบว่ามีการตรวจพบธาตุอะลูมิเนียมบนผิวเมมเบรน แสดงถึงการกำจัดอะลูมิเนียมจากสารส้มที่หลงเหลือในน้ำ



รูปที่ 4.44 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ส่วนน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5.5 g/L ควบคุมพีเอช 6.6 จะปรากฏพีคต่ำกว่าน้ำทิ้งที่ตำแหน่งความถี่ 1,642 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,450 cm^{-1} ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H aliphatic bending และ C-C aromatic stretching และความถี่ 1,100 cm^{-1} ที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching แต่จะปรากฏพีคสูงกว่าที่ตำแหน่งความถี่ 3,400, 1,642 และ 700 cm^{-1} ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับผลการวิจัยของ Mclnture *et al*. (1981) ที่วิเคราะห์ FTIR ของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ละลายน้ำ จะปรากฏพีคสูงที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันคือความถี่ 3,490, 1,650, 2,125 และ 700 cm^{-1} ที่จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน Al – OH – Al และ OH – bending จึงอาจเกิดจากการหลงเหลือของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เติมลงไปเช่นกัน

และเมื่อวิเคราะห์ FTIR ในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะปรากฏพีคที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่โคแอกูเลชันด้วยโพลีอะ ลูมิเนียมคลอไรด์เพียงวิธีเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.45 แต่ที่ตำแหน่งความถี่ 3,400 cm^{-1} อาจปรากฏพีคที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างอาจสัมผัสกับอากาศและความชื้น ดังนั้นการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ สามารถบำบัดกลุ่มสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีในน้ำทิ้ง และสารที่หลงเหลือจากการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ได้ สอดคล้องกับตารางที่ 4.11 ที่การบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย และทำให้ค่าสีลดลง อีกทั้งจากผล EDX จะมีการตรวจพบธาตุอะลูมิเนียมบนผิวเมมเบรน แสดงถึงการกำจัดโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่หลงเหลือในน้ำ

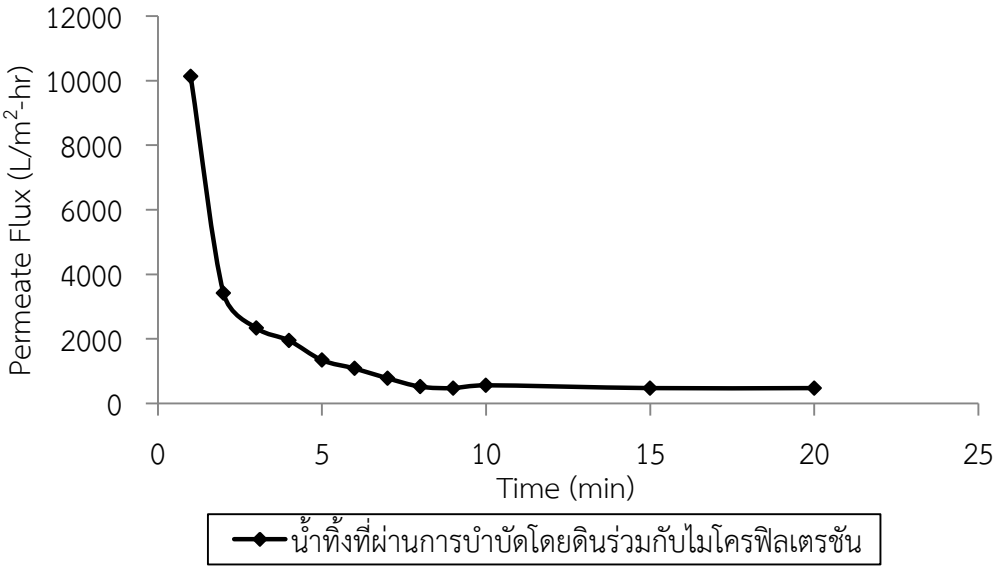


รูปที่ 4.45 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

4.4.3 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดินร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

จากการศึกษาการกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันโดยตรงแล้ว จึงนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และรูปแบบการอุดตันกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินและเข้าสู่เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินจะเลือกใช้ที่อัตรา 3 cm/week เนื่องจากสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ดี และมีการชะละลายของดินออกมาน้อยกว่าที่อัตรา 1 cm/week ซึ่งในการทดลองได้ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ที่ผลิตจาก Polyethersulfone (PES) มีรูพรุนขนาด 0.45 μm เดินระบบแบบ dead – end ที่ความดัน 1 bar เมื่อทำการกรองน้ำกลั่นผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่ามีค่าฟลักซ์เฉลี่ยของน้ำกลั่น 21,501.8 L/m^2-hr และมีความต้านทานของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (R_m) เท่ากับ $1.86 \times 10^{10} m^{-1}$ เมื่อทดลองกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินด้วยอัตรา 3 cm/week ผ่านเมมเบรน พบว่าในนาทีที่ 2 ค่าฟลักซ์จะลดลงมากกว่าร้อยละ 50 โดยทำการกรองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 min สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ปริมาตรประมาณ 544 mL มีค่าฟลักซ์ลดลงเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ย 1,963.2 L/m^2-hr ดังแสดงในรูปที่ 4.46 หลังจากนั้นได้นำเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดน้ำกลั่น แล้วหาประสิทธิภาพการกรองของเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง พบว่ามีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 18,632.23 L/m^2-hr ทำให้มีความต้านทานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง เท่ากับ $2.15 \times 10^{10} m^{-1}$ คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.3) ดังนั้น เมมเบรนจะมีความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (irreversible fouling resistance; R_f) เท่ากับ 2.87×10^9 m^{-1} คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.4) และความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (reversible fouling resistance, R_p) เท่ากับ $1.83 \times 10^{11} m^{-1}$ คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (4.5) โดยค่าความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันของการทดลองควรมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากในสมการที่ (4.5) ได้แทนด้วยค่าความหนืดค่าของน้ำกลั่น ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดิน ดังนั้นค่าความต้านทานรวมของการไหลที่กรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินผ่านเมมเบรนจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้ และทำให้ค่าความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้เช่นกัน

จากการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดินร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีค่าความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงและการเกิดโพลาไรเซชันต่ำกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง ส่งผลทำให้ฟลักซ์มีค่าสูงกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ของการกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันจะเห็นว่า ฟลักซ์ของการกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินมีค่าสูงกว่า เนื่องจากข้อจำกัดในปริมาณน้ำที่นำมากรอง จึงทำให้กรองได้ระยะเวลาสั้นเพียง 20 min ซึ่งหากเทียบในระยะเวลาการกรองที่เท่ากัน จะพบว่าการกรองน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าคือ 2,050.39 และ 2,187.03 L/m^2-hr ตามลำดับ ดังนั้นการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน จะควบคุมการเกิดฟาวลิงบนเมมเบรนได้ดีกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินด้วยอัตรา 3 cm/week พบว่ามีปัจจัยที่ทำให้มีแนวโน้มในการเกิดการอุดตันบนเมมเบรน ดังนี้



รูปที่ 4.46 ค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน อัตรา 3 cm/week ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar กับเวลา

1) Particulate / Colloid fouling จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ที่อัตรา 1 และ 3 cm/week พบว่า มีขนาดอนุภาคหลากหลาย โดยมีขนาดเฉลี่ย 3.5 และ 3.0 μm ตามลำดับ ดังนั้นหากใช้แรงดันขับเคลื่อนน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 0.45 μm จะทำให้อนุภาคเหล่านั้นจะไปอุดตันบนผิวด้านบนของเมมเบรน เกิดเป็น cake – Layer และเนื่องจากมีอนุภาคหลากหลายขนาด จึงทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุน ที่เรียกว่า pore plugging (Franken, 2009) ได้เช่นเดียวกับน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนารโคแอกกูเลชัน
2) Organic fouling จากวิเคราะห์สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน พบว่าค่า SUVA มีค่ามากกว่า 4 L/mg-m ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่ (hydrophobic) เป็นพวกกลุ่ม aromatic มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งจะพบใน humic acid และ hydrophobic acid เช่นเดียวกับน้ำทิ้ง รูปแบบการอุดตันจึงจะเกิดเช่นเดียวกับน้ำทิ้ง
3) Microbial / Biological fouling เนื่องจากในการบำบัดโดยดิน มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชั้นผิวดินใรคอลัมน์ที่สัมผัสกับอากาศ เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ทำให้ซีโอดีมีค่าลดต่ำลง ดังนั้นในน้ำที่ผ่านดินอาจมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนออกมาด้วย หากนำมากรองผ่านเมมเบรนจะทำให้เกิดฟาวลิงประเภทนี้ได้
4) Inorganic / Scaling เนื่องจากในการบำบัดโดยดิน มีกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน และดูดซับโดยดิน ที่ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าการนำไฟฟ้าลดต่ำลง น้ำที่ผ่านดินอาจจะมีการชะไอออนเหล่านี้ออกมา หากนำมากรองผ่านเมมเบรนอาจจะเกิดฟาวลิงประเภทนี้ได้เช่นกัน

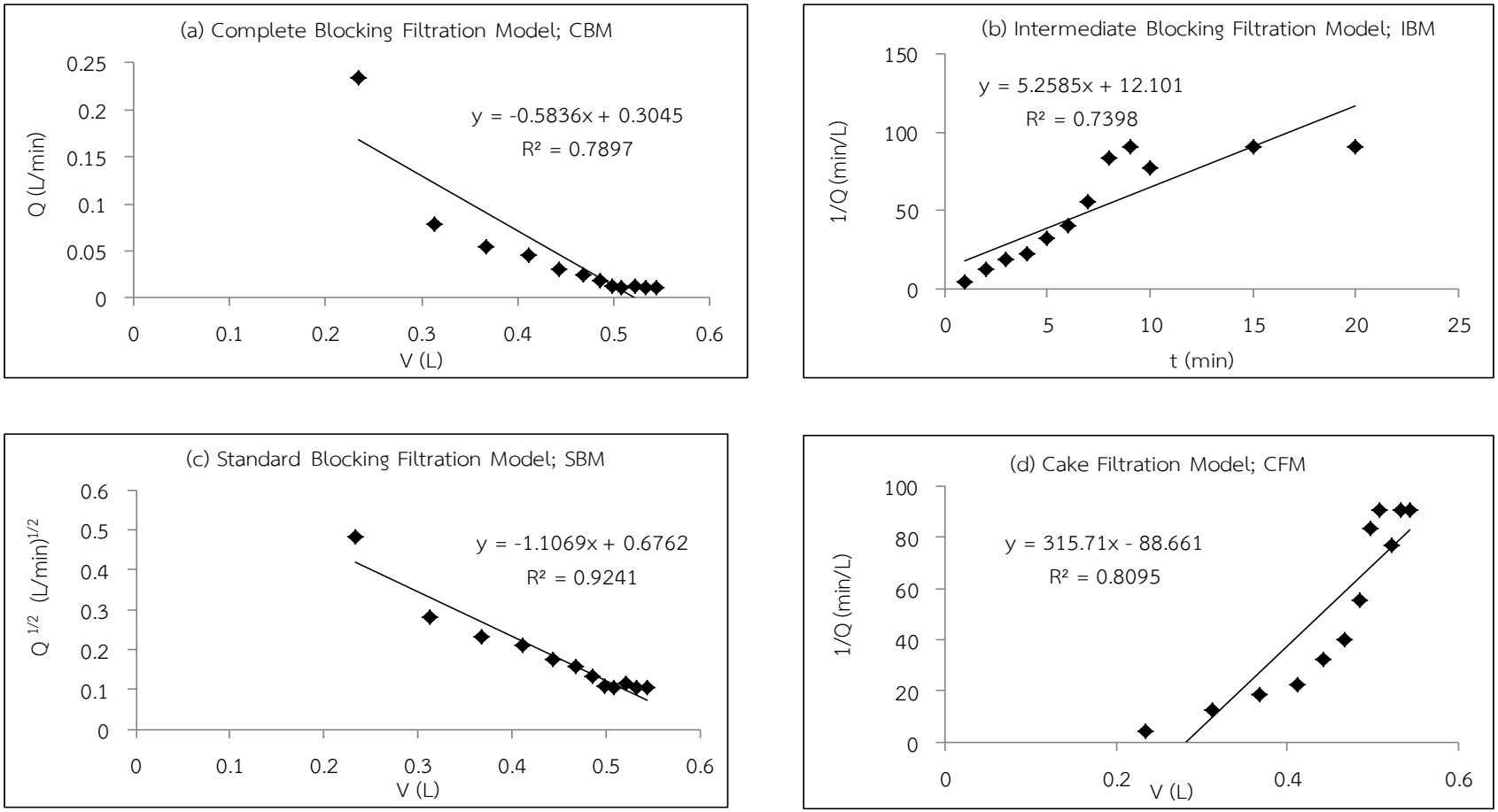
จากปัจจัยต่างๆในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน สามารถทำให้เกิดการอุดตันทั้งในรูพรุนและบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จึงนำมาอธิบายด้วยแบบจำลองการอุดตันของ Hermia (1952) โดยการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.47 พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยการบำบัดโดยดิน อัตรา 3 cm/week ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด คือ แบบจำลอง Standard Blocking Filtration Model (SBM) ที่มีค่า r^2 = 0.92 ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ซึ่งแบบจำลอง SBM สามารถอธิบายได้ว่าการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีลักษณะการอุดตันส่วนใหญ่ เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุน ถูกดูดซับและอุดตันอยู่ภายในรูพรุนของเมมเบรน เรียกว่า pore plugging เป็นส่วนใหญ่ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ซึ่งจากปัจจัยของน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินสำหรับการเกิดการอุดตันที่ได้กล่าวข้างต้นนั้น เห็นได้ว่าจะประกอบด้วยอนุภาคของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ จุลินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่ผสมกัน จึงสามารถเกิดการอุดตันในรูพรุนได้ อีกทั้งเมื่อนำมาเมมเบรนมาถ่ายภาพผิวด้านบนและภาคตัดขวางด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อดูรูปแบบการอุดตัน พบว่าผิวด้านบนของเมมเบรนสะอาดก่อนการกรอง จะปรากฏรูพรุนที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.48 (a) ส่วนเมื่อผ่านการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดิน จะเห็นการอุดตันในรูพรุนและบนผิวเมมเบรน โดยการอุดตันที่ปรากฏในภาพถ่าย SEM จะมีรูปร่างที่หลากหลายลักษณะทั้งเป็นเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.48 (c) จุลินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.48 (e) และจากอนุภาคอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.48 (d, f) ที่มาจากการชะละลายของดิน และน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งหลังจากล้างทำความสะอาดเมมเบรนด้วยด้วย HCl 0.1 N และ NaOH 0.1 N จะเห็นได้ว่า สามารถกำจัดอนุภาคบางส่วนบนผิวเมมเบรนออกไปได้ แต่ก็ยังมีหลงเหลืออยู่บนผิวหน้าและในรูพรุนของเมมเบรน เนื่องจากรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 4.48 (h, i) เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.48 (a, b) ในกำลังขยายที่เท่ากัน

ต่อมาเป็นลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินในอัตรา 3 cm/week ร่วมกับกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.12 เห็นได้ว่าบำบัดของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ EDX ที่พบธาตุในกลุ่มสารอินทรีย์บนผิวเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนสารอินทรีย์ละลายน้ำ และสารอนินทรีย์สามารถบำบัดได้เล็กน้อย อย่างเช่น ค่าสี UV_{254} และการนำไฟฟ้าที่สามารถบำบัดได้น้อยมาก เช่นเดียวกับการกรองน้ำทิ้ง เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนใหญ่จะที่มีขนาดเล็กกว่า 0.22 μm (Owen *et al*.,1993) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าจึงไม่สามารถกักกั้นได้ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กัลยา ศรีสุวรรณ (2542) ที่กรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.45 μm โดยน้ำทิ้งมีลักษณะสมบัติคือ ค่าซีโอดี 480 mg/L ของแข็งแขวนลอย 40 mg/L และสี 175 พบว่าเมื่อนำมากรองผ่านไมโครฟิลเตรชันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 20 – 50 แต่บำบัดสีได้น้อยมาก และเมื่อเปลี่ยนเมมเบรนให้มีรูพรุนขนาดเล็กลงคือ 0.1 และ 0.22 μm ก็พบว่าไม่สามารถบำบัดสีได้ดีกว่าเดิม โดยในการกรองจะมีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 201.15 L/m^2-hr ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองนี้ เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะสมบัติที่ดีกว่าน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงสามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า เกิดการอุดตันที่ช้ากว่า งานวิจัยของ Majouli *et al*., (2012) ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่มีรูพรุน 0.2 μm

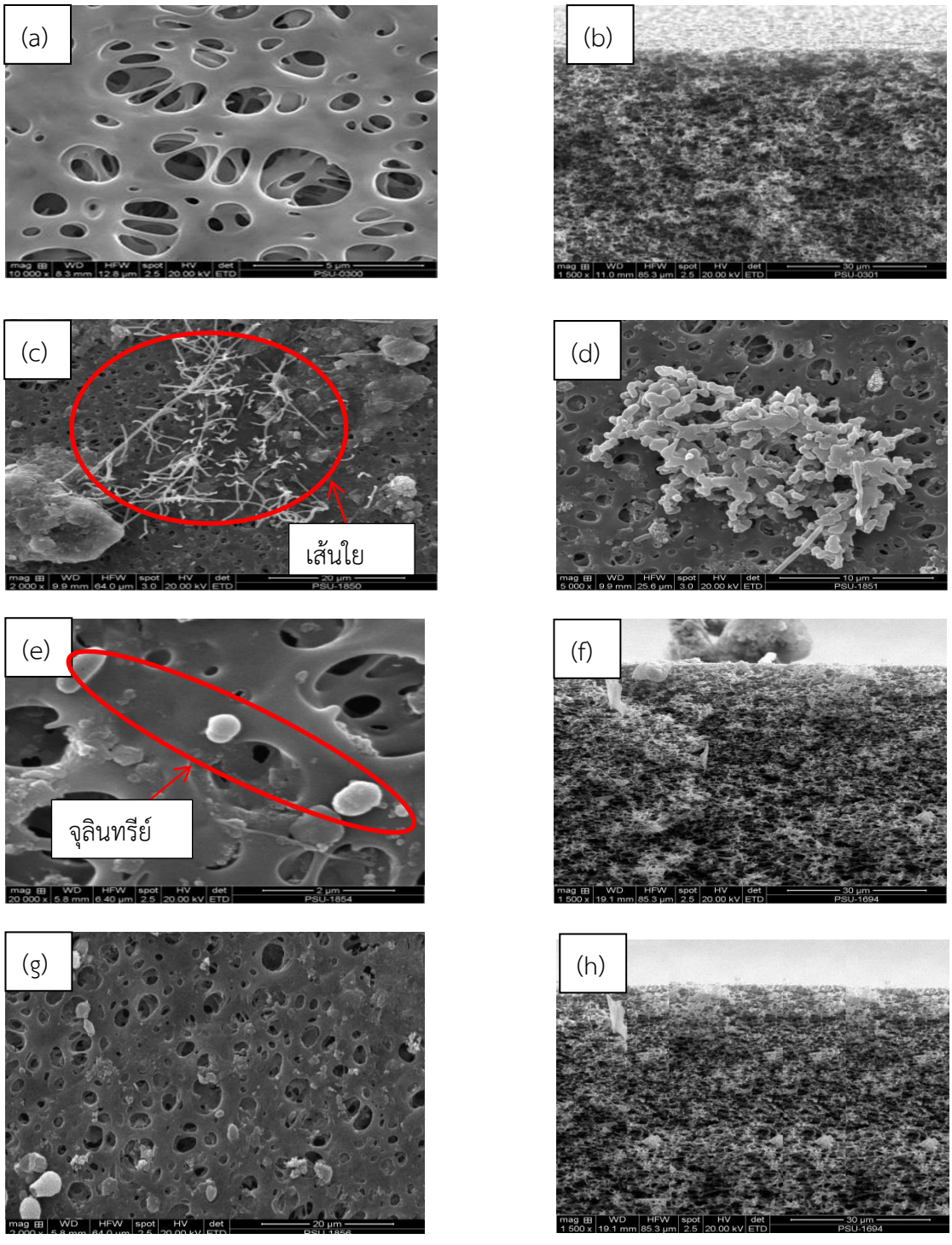
บำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกหนัง พบว่าสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และทีเคเอ็นได้ดี แต่สำหรับค่าการนำไฟฟ้าบำบัดได้เล็กน้อย จากเดิมที่น้ำทิ้งมีค่าการนำไฟฟ้า 22 mS/cm เมื่อกรองผ่านเมมเบรนจะมีค่าลดลงเหลือ 13 mS/cm ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีมากกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง

ตารางที่ 4.12เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินอัตรา 3 cm/week และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินอัตรา 3 cm/week ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	**ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย**		
	น้ำทิ้ง	**น้ำทิ้งที่บำบัดโดยดิน อัตรา 3 cm/week**	**น้ำทิ้งที่บำบัดโดยดิน อัตรา 3 cm/week ร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน**
พีเอช	8.3 – 8.5	8.55	8.2
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	3.96	1.51
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 – 8	4.094	3.835
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	170 – 250	23.1	-
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	5,000 – 5,500	2,897	2,601
UV_{254} (cm^{-1})	10 – 12	7.14	4.89
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	709	295
ซีโอดี (mg/L)	900 – 1,300	253.7	215
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	181.9	164
ดีโอซี (mg/L)	180 - 220	118.4	107.7
ขนาดอนุภาค (μm)	21 – 22	3.0	0.01
SUVA (L/mg-m)	4.5 – 6.7	6.0	4.5



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง(a) CBM (b) IBM (c) SBM และ (d) CFM
ในการกรองน้ำทิ้งที่บำบัดโดยดินด้วยอัตรา 3 cm/week ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 1 bar



รูปที่ 4.48 ผล SEM ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน
surface view (a) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (c, d, e, f) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน (h) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด
cross section view (b) เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสะอาด (g) เมมเบรนที่กรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน (i) เมมเบรนที่ผ่านการล้างทำความสะอาด

4.5 วิเคราะห์แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้

จากการทดลองบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน การบำบัดโดยดิน และเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน เห็นได้ว่าลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีความแตกต่างกัน รวมทั้งค่าใช้จ่าย และความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ ในหัวข้อนี้ จึงนำเสนอแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้ของการบวนการต่างๆ ดังนี้

4.5.1 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

จากการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 ต้องใช้ HCl 1 N ในการปรับพีเอชเป็นปริมาตร 17 mL/L ทำให้มีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีเท่ากับ 269.5 baht/m^3 ส่วนการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L พีเอช 6.5 ต้องใช้ HCl 1 N ในการปรับพีเอชเป็นปริมาตร 6 mL/L ทำให้มีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีเท่ากับ 159 baht/m^3 ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ของการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ราคาสารเคมี	**ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในกระบวนการโคแอกกูเลชัน**	
	สารส้ม 3.5 g/L พีเอช 5.5	**โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L พีเอช 6.5**
สารส้มราคา9 baht/kg โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ราคา 15 baht/kg	(9 baht/kg) x (3.5 g/L) = 31.5 baht/m^3	(15 baht/kg) x (5 g/L) = 75 baht/m^3
HCl 1 N ราคา 14 baht/L	(14 baht/L) x (17 mL/L) = 238 baht/m^3	(14 baht/L) x (6 mL/L) = 84 baht/m^3
ค่าใช้จ่ายรวม	269.5 baht/m^3	159 baht/m^3

สำหรับปริมาณตะกอนที่ต้องกำจัด เมื่อคำนวณจากปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งที่กำจัดได้รวมกับปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ตกตะกอน พบว่า การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 89.5 ทำให้เกิดเป็นตะกอนจากของแข็งแขวนลอยประมาณ 179 mg/L หรือ 0.179 g/L ส่วนการเติมสารส้ม 1 g จะเกิดเป็นตะกอน $Al(OH)_3$ เท่ากับ 156/594 = 0.26 g ดังสมการที่ (4.18) ซึ่งในการบำบัดน้ำทิ้งจะเติมสารส้ม 3.5 g/L จึงเกิดเป็นตะกอน $Al(OH)_3$ เท่ากับ 3.5 x 0.26 = 0.91 g/L ดังนั้นปริมาณตะกอนทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 0.179 + 0.91 = 1.09 g/L หรือ 1.09 kg/m^3 และสำหรับการใช้โพลีอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 90 ทำให้เกิดเป็นตะกอนจากของแข็งแขวนลอยประมาณ 180 mg/L หรือ 0.18 g/L ส่วนการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 1 g จะเกิดเป็นตะกอน $Al(OH)_3$ เท่ากับ 312/423 = 0.73 g ดังสมการที่ (4.19) ซึ่งในการบำบัดน้ำทิ้งจะเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L จึงเกิดเป็นตะกอน

$Al(OH)_3$ เท่ากับ 5 x 0.73 = 3.65 g/L ดังนั้นปริมาณตะกอนทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 0.18 + 3.65 = 3.8 g/L หรือ 3.8 kg/m^3

$$Al_2(SO_4)_3\ 14H_2O + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 6CO_2 + 14H_2O \quad (4.18)$$
(594) (156)

$$2Al_2(OH)_3Cl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 4Al\ (OH)_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2 \quad (4.19)$$
(423) (312)

โดยตะกอนที่ได้จากการคำนวณเป็นปริมาณตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำออกแล้ว หรือตะกอนแห้งที่สามารถไปใช้ในการถมที่ได้ ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L พีเอช 6.5 มีความเหมาะสมในการนำมาใช้บำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมากกว่าการใช้สารส้ม 3.5 g/L พีเอช 5.5 ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน และเกิดตะกอนมากกว่า แต่โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ปรับพีเอชต่ำกว่า และมีการหลงหลือของอะลูมิเนียมที่น้อยกว่า อีกทั้งในการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถที่จะลดความเข้มข้นให้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและซีโอดีในความเข้มข้นที่ต่ำกว่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งหากใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า จะทำให้ค่าใช้จ่ายในด้านสารสร้างตะกอน และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันเห็นได้ว่ามีค่าใช้จ่ายสูง หากต้องการจะบำบัดเพื่อปล่อยทิ้งอาจไม่เหมาะสม จึงควรนำน้ำที่ผ่านการบำบัดนี้ไปปรับปรุงคุณภาพเพื่อที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ หรือหากต้องการบำบัดเพื่อปล่อยทิ้ง ควรลดความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่ใช้ เพื่อให้เกิดเพียงกลไกการดูดซับและทำลายประจุของอนุภาค หรือเพิ่มความขุ่นในน้ำทิ้งให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้ตกตะกอนได้ง่าย อย่างเช่นงานวิจัยของ Ahmad *et al*. (2006) ใช้น้ำเสียก่อนการบำบัดแบบบ่อของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมาบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยในน้ำเสียมีค่าความขุ่นสูงประมาณ 11,000 NTU และซีโอดีประมาณ 50,000 mg/L จะใช้สารส้มเพียง 0.05 v/v ร่วมกับโพลีเมอร์ ควบคุมพีเอช 5.5 – 6.5 โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดจะหลงเหลือความขุ่น 34 NTU และซีโอดี 15,000 mg/L ซึ่งยังคงมีค่าสูง หากเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ที่ใช้น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่มีค่าความขุ่น 110 – 130 NTU ซีโอดี 900 – 1,300 mg/L มาโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม 3.5 g/L พีเอช 5.5 พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดหลงเหลือค่าความขุ่น 3.05 NTU และซีโอดี 236.06 mg/L เห็นได้ว่าการใช้น้ำเสียที่มีความขุ่นและซีโอดีสูง จะใช้ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนไม่มากนัก แต่ลักษณะสมบัติน้ำจะยังมีค่าเหล่านั้นหลงเหลืออยู่มาก แต่ถ้าใช้น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจะต้องใช้สารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้นสูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีกว่า อีกทั้งจะกำจัดสีในน้ำทิ้งได้มากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ลักษณะสมบัติของน้ำอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	**สารสร้างตะกอน**	**สภาวะที่ควบคุม**	**ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการการโคแอกกูเลชัน**	**อ้างอิง**
น้ำเสีย ของแข็งแขวนลอย 18,000 mg/L ซีโอดี 50,000 mg/L น้ำมันและไขมัน 4,000 – 6,000 mg/L	ไคโตรซาน 0.5 g/L พีเอช 4	กวนเร็ว 100 rpm 15 min ตกตะกอน 20 min	ของแข็งแขวนลอยน้อยกว่า 900 mg/L ซีโอดีน้อยกว่า 2,500 mg/L	Ahmad *et al*. (2006)
	สารส้ม 8 g/L พีเอช 4.5	กวนเร็ว 100 rpm 30 min ตกตะกอน 50 min		
	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 6 g/L พีเอช 4.5	กวนเร็ว 100 rpm 30 min ตกตะกอน 60 min		
น้ำเสีย พีเอช 4.3 – 5.1 ของแข็งแขวนลอย 15,000 – 20,000 mg/L ซีโอดี 43,000 – 51,000 mg/L ความขุ่น 11,613 NTU	ไคโตรซานร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโน 250 mg/Lพีเอช 6	กวนเร็ว 250 rpm 3 min กวนช้า 30 rpm 30min ตกตะกอน 60 min	ความขุ่น 139 NTU ของแข็งแขวนลอย 480 mg/L ซีโอดี 18,750 mg/L	Saifuddin and Dinara (2011)
	ไคโตรซาน 370 mg/L พีเอช 6		ความขุ่น 267 NTU ของแข็งแขวนลอย 1,660 mg/L ซีโอดี 28,650 mg/L	
น้ำเสีย พีเอช 4.7 สี 151 color unit ซีโอดี 50,000 mg/L ความขุ่น 11,000 NTU น้ำมันและไขมัน 4,000 mg/L	สารส้ม 0.05 v/v ร่วมกับแอนไอออนิกพอลิเมอร์ 0.015 v/v พีเอช 5.5 – 6.5	กวนเร็ว 50 rpm 60min กวน 10 rpm 30 min	พีเอช 6.63 สี 128 color unit ซีโอดี 15,000 mg/L ความขุ่น 34 NTU น้ำมันและไขมัน 80 mg/L	Ahmad *et al*. (2006)

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (ต่อ)

ลักษณะสมบัติของน้ำอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	**สารสร้างตะกอน**	**สภาวะที่ควบคุม**	**ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการการโคแอกกูเลชัน**	**อ้างอิง**
น้ำทิ้ง พีเอช 8.6 สี 112.8 mg/L ความขุ่น 34 NTU ซีโอดี 1,920 mg/L	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 70 mg/L พีเอช 7	กวนเร็ว 1 min กวนช้า 30 min ตกตะกอน 1hr	ความขุ่น 14.3 NTU สี 18 mg/L ซีโอดี 268 mg/L	สุปรีดา วัชรจิร โสภณ และนันทนา ดาโอะ (2554)
น้ำทิ้ง **พีเอช 8.3 – 8.5** **สี 1,600 -1,700 ADMI** **ความขุ่น 110 – 130 NTU** **ของแข็งแขวนลอย 170 – 250 mg/L** **ซีโอดี 900 – 1,300 mg/L**	**สารส้ม 3.5 g/L** **พีเอช 5.5**	**กวนเร็ว 100 rpm 1 min** **กวนช้า 30 rpm 30min** **ตกตะกอน 1 hr**	**สี 270 ADMI** **ความขุ่น 3.1 NTU** **ของแข็งแขวนลอย 21 mg/L** **ซีโอดี 236.06 mg/L**	**ผลที่ได้จากการทดลอง**
	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5 g/L **พีเอช 6.5**		**สี 209 ADMI** **ความขุ่น 3.05 NTU** **ของแข็งแขวนลอย 20 mg/L** **ซีโอดี 209.83 mg/L**	

4.5.2 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดิน

จากการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินทรายปนตะกอนทราย ในคอลัมน์พีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 cm สูง 100 cm มีค่าใช้จ่ายประมาณ 1,000 baht/column และทำการบรรจุดินในสวนปาล์มให้มีความสูง 75 cm พบว่า การเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 1 cm/week ในระยะเวลา 14 สัปดาห์ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด UV_{254} สี ซีโอดี ดีโอซี และทีโอซีได้ดีกว่าการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week ส่วนการเติมน้ำทิ้ง 3 cm/week นั้นจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น และของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งได้ดีกว่า อีกทั้งสามารถบำบัดน้ำทิ้งได้มากกว่าถึง 3 เท่า ซึ่งจากงานวิจัยของ พัชร สนั่นพัฒนพงศ์ (2555) ได้สรุปถึงเกณฑ์การบำบัดที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางข้นโดยดินในสวนปาล์ม คือ อัตราที่ ≤ 3 cm/week จะไม่ส่งผลกระทบต่อต้นปาล์ม และสามารถใช้อัตราที่สูงถึง 10 cm/week ได้หากน้ำทิ้งมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ แต่จากลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เห็นได้ว่ามีสารอินทรีย์ปนเปื้อนสูง จึงเหมาะที่จะใช้อัตราที่ ≤ 3 cm/week โดยในระยะเวลาการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม 14 สัปดาห์ พบว่าคอลัมน์ดินยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งต่อไปได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ กาญจนี ชูทอง (2555) ที่ทำการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมปาล์มโดยดินในคอลัมน์ที่มีรูปแบบและการดำเนินการวิจัยใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ พบว่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดพีเอช ซีโอดี และทีเคเอ็นลดต่ำลง หลังจากเดินระบบประมาณ 126 วันหรือ 18 สัปดาห์ ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าคอลัมน์ดินในงานวิจัยนี้สามารถบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวต่อไปได้อีกประมาณ 4 สัปดาห์ และเนื่องจากโรงงานที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง มีน้ำทิ้งเกิดขึ้นประมาณ 400 m^3/d หากจะทำการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินในอัตรา 1 และ 3 cm/week ทำการเติมน้ำทิ้งทุกวัน จะต้องใช้พื้นที่ 0.28 และ 0.09 km^2 ตามลำดับ สามารถบำบัดได้ประมาณ 18 สัปดาห์ ซึ่งจากผลการวิจัย พบว่า การบำบัดน้ำทิ้งโดยดินในคอลัมน์ยังไม่เหมาะสมหากจะนำไปใช้จริง เนื่องจากบำบัดน้ำทิ้งได้ในปริมาณน้อย ใช้ระยะเวลานาน น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และเมื่อประสิทธิภาพการบำบัดของดินลดต่ำลงไม่สามารถที่จะทำดินมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่หากต้องการนำไปใช้อาจจะบำบัด ร่วมกับวิธีอื่นๆ เช่น ต่อด้วยกระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับ เช่น แอคติเวสเตจคาร์บอน เนื่องจากน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน 3 cm/week มีความขุ่นและของแข็งแขวนลอยต่ำมาก แต่หลงเหลือสารอินทรีย์ และสี ซึ่งกระบวนการดูดซับมีความสามารถที่จะบำบัดได้ แต่หากจะทำการบำบัดน้ำทิ้งก่อนการบำบัดโดยดินนั้น อาจจะเหมาะสมกับวิธีการบำบัดทางชีวภาพ

สำหรับการนำไปใช้จริง หากจะนำดินในสวนปาล์มมาบรรจุคอลัมน์เพื่อบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มคงไม่เหมาะสม ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงอาจเปลี่ยนภาชนะบรรจุดินเป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก มีการปลูกพืชร่วมด้วย และมีการวางท่อสำหรับเก็บน้ำด้านล่างที่ไหลผ่านชั้นดิน ซึ่งเป็นระบบที่ใช้เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรเลีย ได้เรียกระบบนี้ว่า FILTER (Filtration and Irrigated Cropping for Land Treatment and Effluent Reuse) ซึ่งมีข้อดีคือ พืชสามารถใช้สารอาหารในน้ำเสีย เพื่อการเจริญเติบโตได้ ร่วมทั้งพืชและดินจะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้มากขึ้น แต่ระบบนี้จะพบปัญหาคือ เมื่อเดินระบบเป็นเวลานาน ดินจะเกิดการอุดตัน ทำให้น้ำเสียไม่สามารถซึมได้ทัน จึงควรลดอัตราการเติมน้ำหรือเว้นระยะเวลาในการเติมน้ำเสีย อย่างงานวิจัยของ โรสนา กาซอ (2555) บำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดิน

ในสวนปาล์ม พบว่าการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตราที่ 1 cm/week จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี และฟอสฟอรัสได้ดี งานวิจัยของ Duan (2015) ใช้ระบบ FILTER เป็นดินจากไร่อ้อยที่มีการปลูกหญ้า มาบำบัดน้ำเสียฟาร์มโคนมที่ผ่าน Activated lagoon ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่ามีประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซีโอดี และทีโอซีได้ร้อยละ 86.1, 78.2, 94.6, 76.8 และ 74.6 ตามลำดับ โดยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียส่วนหนึ่งจะถูกหญ้านำไปใช้ งานวิจัยของ Christen (2010) ใช้ระบบ FILTER เป็นดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการปลูกหญ้าขนาด 250 x 40 x 1 m มาบำบัดน้ำเสียโรงงานกลั่นไวน์ พบว่าระบบสามารถรองรับน้ำเสียได้ 2,500 m^3 น้ำที่ไหลซึมออกประมาณ 30 – 45 m^3/d สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยและบีโอดีในน้ำเสียได้ดี ดินที่ใช้ในการบำบัดมีการสะสมของโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นแต่โซเดียมและธาตุอาหารลดลง อีกทั้งในน้ำเสียมีสารอินทรีย์สูงทำให้ดินเกิดการอุดตัน ดังนั้นระบบนี้จะใช้ทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลกระทบในการบำบัดโดยดิน เช่น ลักษณะสมบัติของดิน สภาพภูมิอากาศ อัตราการรองรับประสิทธิภาพในการบำบัดของดินและพืช ระยะเวลา ค่าใช้จ่าย ผลดีและผลเสียต่อดินและพืช เป็นต้น จากงานวิจัยข้างต้น เห็นได้ว่าการบำบัดโดยดินร่วมกับพืชจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.15 ข้อดีและข้อจำกัดของการกระบวนการโคแอกกูเลชันและการบำบัดโดยดินในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่ได้จากการทดลอง

ข้อดีและข้อจำกัด	กระบวนการโคแอกกูเลชัน	การบำบัดโดยดิน
ข้อดี	— มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง — บำบัดน้ำทิ้งในปริมาณมากได้ — ใช้ระยะเวลาในการบำบัดไม่มากนัก	— ค่าใช้จ่ายต่ำ — มีประสิทธิภาพการบำบัดดีพอสมควร
ข้อจำกัด	— เกิดตะกอนปริมาณมาก — ต้องใช้สารสร้างตะกอนความเข้มข้นสูง — มีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี การก่อสร้างและดูแลระบบ	— บำบัดน้ำทิ้งได้ปริมาณน้อย — หากเดินระบบเป็นเวลานานจะทำให้ดินเกิดการอุดตัน

4.5.3 การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการบำบัดโดยดินร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเมมเบรนไมโครฟลิเตรชันขนาดรูพรุน 0.45 μm พบว่าจะเกิดฟาวลิงบนเมมเบรนอย่างรวดเร็ว จากพวกของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และจุลินทรีย์ในน้ำทิ้ง โดยเกิดการอุดตันในรูปแบบ cake – layer คือจะมีการอุดตันทั้งบนผิวและในรูพรุนเมมเบรน ส่วนลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรนยังคงมีค่าต่างๆ สูงอยู่ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และพบว่าการอุดตันบนเมมเบรนประกอบด้วยธาตุอาหาร เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียมและไนโตรเจน ซึ่งมีความจำเป็นต่อพืช จึงอาจต้องศึกษาถึงปริมาณธาตุอาหารที่ตรวจพบเหล่านั้น เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ประโยชน์

อีกทั้งได้ทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางกายภาพเคมีคือ กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มและโพลีอะลูมิเนียม ก่อนที่จะกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่าวิธีทางกายภาพเคมี มีประสิทธิภาพบำบัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้สูง ทำให้เมื่อกรองผ่านเมมเบรนจะสามารถเดินระบบได้นานขึ้น โดยการอุดตันจะมีทั้งแบบ cake layer และ pore plugging ที่เกิดจากของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารส้มความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L พีเอช 6.5 ควรเลือกใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เนื่องจากมีลักษณะสมบัติของน้ำที่กรองผ่านเมมเบรนมีคุณภาพดีกว่า ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์สูงกว่า ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงและโพลาไรเซชันต่ำกว่า ราคาสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชต่ำกว่าการใช้สารส้ม ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่โคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรน พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่สูงกว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียวมากนัก ซึ่งในการกรองผ่านเมมเบรนควรจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่า เนื่องมาจากในการทดลองเลือกใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรูพรุน 0.45 μm ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถกรองสารพวกที่ละลายน้ำได้มากนัก จึงควรเปลี่ยนชนิดเมมเบรนให้มีรูพรุนขนาดเล็กลง และเพื่อให้เกิดฟาวลิงหรือโพลาไรเซชันให้น้อยลงควรเดินระบบแบบ cross flow ดังงานวิจัยของจากงานวิจัยของ Ahmad *et al*. (2006) ที่บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มร่วมกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO 200,000 เดินระบบแบบ cross flow พบว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันจะมีค่าฟลักซ์ลดลงร้อยละ 50 เมื่อทำการกรอง 6 hr. ขึ้นไป จะเกิดการอุดตันแบบ cake – layer แต่จะไม่มีการอุดตันในรูพรุน (pore blocking) และเมื่อล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีจะสามารถกำจัดการอุดตันบนเมมเบรนออกได้ นอกจากการบำบัดน้ำทิ้งก่อนเข้าเมมเบรนด้วยวิธีทางกายภาพเคมีแล้ว ในการทดลองได้บำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางกายภาพชีวภาพด้วยคือ การบำบัดโดยดิน ในอัตรา 3 cm/week ก่อนที่จะกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ดี ส่วนสารอินทรีย์ยังไม่ดีมากนัก เนื่องจากวิธีการนี้จะมีการชะละลายของดินปนเปื้อนออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย ทำให้เมื่อกรองผ่านเมมเบรน จะมีการอุดตันที่เกิดขึ้นประเภทเดียวกับการกรองน้ำทิ้งโดยตรง แต่จะมีการอุดตันที่ช้ากว่า

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน น้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	**ค่าที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย**				
	POME	**POME + MF**	**POME + Alum + MF**	**POME + PACl + MF**	**POME + Land treated +MF**
พีเอช	8.3 – 8.5	8.3	5.1	6.5	8.55
ความขุ่น (NTU)	110 – 130	1.79	0.595	0.595	1.51
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	7 – 8	6.754	6.287	6.231	3.835
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	5,000 – 5,500	4,376	4,295	4,295	2,601
UV_{254} (cm^{-1})	10 – 12	9.445	2.02	1.99	4.89
สี (ADMI)	1,600 – 1,700	1,604	249	196	295
ซีโอดี (mg/L)	900 – 1,300	592	192	185	215
ทีโอซี (mg/L)	600 – 700	548	148	137	164
ดีโอซี (mg/L)	180 – 220	189.1	62.81	60.4	107.7
ขนาดอนุภาค (µm)	21 – 22	0.03	< 0.001	< 0.001	0.01
SUVA	4.5 – 6.7	5.0	3.21	3.3	4.5
ดัชนีตะกอน	-	-	2.51	2.39	-

หมายเหตุ POME คือ น้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

POME + MF คือน้ำทิ้งที่กรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

POME + Alum + MF คือน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยวิธีกายภาพเคมี (โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม) ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

POME + PACl + MF คือน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยวิธีกายภาพเคมี (โคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์) ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

POME + Land treated + MF คือน้ำทิ้งที่บำบัดด้วยวิธีกายภาพ/ชีวภาพ (การบำบัดโดยดิน อัตรา 3 cm/week) ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

จากตารางที่ 4.16 เห็นได้ว่าการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางกายภาพเคมี (โคแอกกูเลชัน) ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด คือ สามารถลดความขุ่น UV_{254} สี ซีโอดี ทีโอซี และดีโอซีได้ดี อีกทั้งมีค่า SUVA น้อยกว่า 4 สามารถอธิบายได้ว่าในน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนจะประกอบด้วยสารอินทรีย์

กลุ่มไม่ชอบน้ำ และชอบน้ำปนเปื้อนอยู่ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันเพียงวิธีเดียว แสดงว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.45 μm ไม่สามารถกักกันสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำได้มากนัก ในการนำไปประยุกต์ใช้นั้น จึงควรเปลี่ยนประเภทของเมมเบรนให้มีรูพรุนเล็กกว่า 0.45 μm อย่างเช่น เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน หรือนาโนฟิลเตรชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารที่อยู่ในรูปละลายน้ำหรือชอบน้ำ และเพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างอาจใช้เป็นวิธี In – line coagulation คือเป็นการเติมสารสร้างตะกอนก่อนกรองผ่านเมมเบรน โดยมีการผสมอย่างรวดเร็วเพื่อให้รวมตัวเป็นฟล็อก แล้วกรอง ซึ่งกระบวนการนี้จะไม่มีการตกตะกอนก่อน ถึงแม้จะมีการอุดตันเกิดขึ้นมาก แต่จะเกิดการอุดตันเป็นชั้นเค้กมากกว่าแบบ pore blocking ซึ่งสามารถกำจัดออกโดยการ backwash ได้ง่ายกว่า (Abdelrasoul *et al*., 2013) และจะช่วยลดความต้านทานการไหล ทำให้สามารถกรองน้ำได้มากขึ้น

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจะมีสีน้ำตาลเข้ม ค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างสูง มีค่าของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ และซีโอดีสูง โดยสีน้ำตาลของน้ำทิ้งนี้เกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม humic acid เป็นส่วนใหญ่ ที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching, C=O stretching, aliphatic C-H bending, aromatic C-C stretching, C-O stretching และ C-H ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.45 μm เนื่องจากฟลักซ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าฟลักซ์เฉลี่ย 70.41 L/m^2-hr เกิดจากการอุดตันของพวกอนุภาคและสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ในรูปแบบ Cake Filtration Model (CFM) คือมีการอุดตันภายในรูพรุนและมีการซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นเป็นชั้นเค้กบนผิวเมมเบรน เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX จะพบทั้งธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ไนโตรเจน และโพแทสเซียม โดยเมมเบรนสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย และสารอินทรีย์ไม่ละลายน้ำได้บางส่วน จึงยังปรากฏสีน้ำตาลในน้ำทิ้งที่ผ่านเมมเบรน สอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงงานที่นำน้ำทิ้งนี้มากรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันเพื่อใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่รีเวิร์สออสโมซิส ทำให้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็วเช่นกัน งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการบำบัดโดยดินมาบำบัดน้ำทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์มก่อนกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน เพื่อลดการอุดตันที่เกิดขึ้นบนเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

การบำบัดน้ำทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารสร้างตะกอน 2 ชนิดคือ สารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ จะได้ความเข้มข้นและค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L พีเอช 5.5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแข็งแขวนลอย และสีได้ร้อยละ 97.3, 89.5 และ 83.5 ตามลำดับ ลดค่า UV_{254} ซีโอดี ทีโอซี และดีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 60 ส่วนโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ใช้ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้สารส้มเล็กน้อย คือบำบัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอย และสี (ADMI) ได้ร้อยละ 97.4, 90 และ 87.3 ตามลำดับ ลดค่า UV_{254} ซีโอดี ทีโอซี และดีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 60 เช่นกัน โดยน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิดจะมีคุณภาพที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงหลงเหลือสารอินทรีย์ในกลุ่มของ humic acid – like และ fuvic – acid like โดยปรากฏเป็นสีเหลืองอ่อนจากสารอินทรีย์กลุ่ม fulvic acid เป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งในกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะหลงเหลืออะลูมิเนียมในน้ำทิ้งเท่ากับ 2.37 และ 0.2 mg/L ตามลำดับ มีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีเท่ากับ 269.5 และ 159 $baht/m^3$ ตามลำดับ และมีตะกอนที่ต้องกำจัดเท่ากับ 1.09 และ 3.8 kg/m^3 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้โพลีอะลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 ในการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าว เนื่องจากมีประสิทธิภาพบำบัดดีกว่า ค่าใช้จ่ายต่ำกว่า และมีสารสร้างตะกอนตกค้างน้อยกว่า เมื่อนำน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ดังกล่าวมากรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 0.45 μm จะมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยมากกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรงถึง 31 เท่า เกิดการอุด

ตันจากสารอินทรีย์ในรูปแบบ Intermediate Blocking Filtration Model (IBM) คือมีการอุดตันภายในรูพรุนเป็นส่วนใหญ่ และมีการซ้อนทับกันบนผิวเมมเบรน แต่จะไม่สะสมจนเป็นชั้นเค้ก จึงไม่พบธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ไนโตรเจน และโพแทสเซียมด้วยเทคนิค EDX ซึ่งน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันนี้ จะไม่พบของแข็งแขวนลอย แต่ยังคงหลงเหลือกลุ่มสารอินทรีย์อยู่ โดยมีประสิทธิภาพในการลด UV_{254} สี ซีโอดี และดีโอซีสูงกว่าการกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันโดยตรง คือร้อยละ 78.9, 87.8, 68.8 และ 68 ตามลำดับ ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 สามารถควบคุมการอุดตันที่เกิดบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันได้ และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันจะมีคุณภาพที่ดีกว่าการกรองน้ำทิ้งผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันโดยตรง

ต่อมาเป็นการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินในคอลัมน์ ระยะเวลา 14 สัปดาห์ ด้วยการเติมน้ำทิ้ง 2 อัตรา คือ 1 cm/week จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และทีโอซี มากกว่าร้อยละ 70 ลดค่า UV_{254} สี และดีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 45 ส่วนการเติมน้ำทิ้งด้วยอัตรา 3 cm/week มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 96.7 และ 88.45 ตามลำดับ บำบัดซีโอดี และทีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 70 ลดค่า UV_{254} สี และดีโอซีได้มากกว่าร้อยละ 35 ซึ่งน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินทั้งสองอัตรามีคุณภาพดีขึ้น แต่ยังมีคุณภาพด้อยกว่า และใช้เวลานานกว่าการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน อีกทั้งยังคงหลงเหลือสารอินทรีย์ในกลุ่มของ humic acid – like และ fuvic – acid like โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินจะปรากฏเป็นสีเหลืองเข้ม ซึ่งจากผลของคอลัมน์ควบคุม โดยการเติมกลั่นด้วยอัตรา 1 cm/week จะมีการชะละลายของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดินปนเปื้อนมากับน้ำที่ผ่านการบำบัดมากกว่าที่อัตรา 3 cm/week ดังนั้นจึงเลือกการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดิน ด้วยอัตรา 3 cm/week เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ดีกว่า และมีการชะละลายของดินต่ำกว่า ซึ่งเมื่อนำไปกรองผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน เดินระบบเช่นเดียวกับการกรองน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน จะมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยสูงกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรงถึง 27 เท่า เกิดการอุดตันจากสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในรูปแบบของ Standard Blocking Filtration Model (SBM) คือมีการอุดตันและถูกดูดซับภายในรูพรุนเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ โดยคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันนี้ จะไม่พบของแข็งแขวนลอย และยังคงหลงเหลือกลุ่มสารอินทรีย์มากกว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน แต่จะมีประสิทธิภาพในการลดสี และซีโอดีสูงกว่าการกรองน้ำทิ้งโดยตรง คือร้อยละ 81.6 และ 63.7 ตามลำดับ ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินในคอลัมน์ ด้วยอัตรา 3 cm/week สามารถควบคุมการอุดตันที่เกิดบนผิวเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันได้ แต่มีประสิทธิภาพในการควบคุมการอุดตันและการบำบัดด้อยกว่าการบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L ควบคุมพีเอช 6.5 ร่วมกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

ข้อเสนอแนะ

1) กระบวนการโคแอกกูเลชัน
   - จากการทดลองด้วยเครื่องจาร์เทสต์ แล้วเก็บน้ำมาวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ จึงควรมีการวิเคราะห์ Zeta potential ร่วมด้วย
   - ในการทดลองได้ใช้สารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือ สารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อนำมาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งพบว่าจะต้องใช้ในความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดอะลูมิเนียมตกค้างในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด และเกิดปริมาณตะกอนมาก ดังนั้นจึงควรศึกษาสารสร้างตะกอนอื่นๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ
   - ในการทดลองมีการควบคุมอัตราการกวนเร็วที่ 100 rpm เป็นเวลา 1 min กวนช้า 30 rpm เป็นเวลา 30 min และตั้งให้ตกตะกอน 1 hr จึงควรมีการหาอัตราการกวน และระยะเวลาในการตกตะกอนช่วงอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด
2) การบำบัดโดยดิน
   - ดินที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง คือทรายปนตะกอนทราย ซึ่งมีอัตราส่วนของทรายเป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีการชะละลายของดินปนเปื้อนออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด จึงอาจทดลององค์ประกอบของดินในอัตราส่วนอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด หรือลดการชะละลายของดิน
   - จากการทดลองทำการศึกษาคุณสมบัติของดินก่อนการบำบัด แต่ไม่ได้ศึกษาคุณสมบัติหลังการบำบัด ทำให้ไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในดิน เช่น ประสิทธิภาพในการดูดซับแต่ละความลึกของดิน ดังนั้นจึงควรศึกษาคุณสมบัติของดินหลังการทดลอง รวมทั้งระยะเวลาที่ดินสามารถบำบัดน้ำทิ้งได้
3) การบำบัดโดยใช้เมมเบรน
   - จากทดลองใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันรูพรุน 0.45 μm ในการบำบัดน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน จึงทำให้ไม่สามารถกักกันสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ จึงควรศึกษาทั้งชนิดของเมมเบรนและขนาดรูพรุนอื่นๆ รวมทั้งควบคุมสภาวะในการเดินระบบให้เหมือนกัน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการควบคุมฟาวลิงที่เกิดขึ้นได้
   - การวิเคราะห์ธาตุบนผิวเมมเบรนด้วยเทคนิค EDX ควรวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพ ทำให้ไม่สามารถบอกเป็นปริมาณและนำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้ จึงควรวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อให้ทราบสัดส่วนที่แน่นอน สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ และจะได้พิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. (2556). ความรู้เรื่องดินสำหรับเยาวชน. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2556, จาก http://oss101.ldd.go.th/web_soils_for_youth/s_prop_text2.htm

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). คู่มือการปฏิบัติที่ดี การเปลี่ยนแปลงของเสียเป็นพลังงานในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. กระทรวงพลังงาน.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2557). คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรม. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2557, จาก http://www2.diw.go.th/I_Standard/.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 5 มกราคม 2558, จาก http://www.isosmartpro.com/private_folder/DRAFT_LAW/WastewaterFactoryDraft.pdf.

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (2539). กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ.2539.

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2539). กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ออกตามพระราชบัญญัติ โรงงาน พ.ศ. 2535.

กฤษดา ทองนาค. (2553). การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาในกระบวนการสร้างและรวมตักอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำกลองและแม่น้ำท่าจีน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.

กัลยา ศรีสุวรรณ. (2542). โมเดลการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนสำหรับการกำจัดสีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กาญจนา ธนิกกุล. (2553). การปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดสีและการลดการใช้สารเคมีในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี กรณีตัวอย่างโรงงานฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติใน จ.ราชบุรี. การนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยศิลปากร, 133 - 143.

กาญจนี ชูทอง. (2555). กลไกการบาบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้าทิ้งจากโรงงานสกัดน้ามัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กุสุมาลย์ ล่องแก้ว. (2557). การลดสารประกอบฟีนอลิคด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและการบำบัดโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2542). การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: หจก.สยามสเตชันเนอรี่.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

จุฑารัตน์ หนูสุข. (2546). การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. (2556). การทดสอบความซึมได้ของน้ำในดิน. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2556, จาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์: http://intranet.dwr.go.th/bwrd/060miscellaneous/Permeability_Test.pd

เชิดพันธ์ อมรกุล และ สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์. (2558). สื่อการสอนปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2558, จาก ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch07/ch073_theory.htm

ธนกฤต พรหมทอง. (2552). การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธนิต เฉลิมยานนท์. (2550). ธรณีเทคนิคของของเสีย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธิดารัตน์ บุญศรี. (2543). การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บทความเกษตรวาฬน้ำเงิน. (2557). อินทรียวัตถุในดิน (organic matter). ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2557, จาก http://www.tgiplus.com/14736154/%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B9%8C%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%96%E0%B8%B8%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B8%94%E0%B8%B4%E0%B8%99

บัสรี หะยีปะดอเห็ง และ ประธาน กรกิติประภา. (2552). รายงานวิจัยเรื่องความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการเมมเบรน เพื่อการบำบัดน้ำทิ้งสำหรับนำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประยูร ฟองสถิต และจุฑามาศ บุญมา. (2554). การใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2555, จาก http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a19.shtml

พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. (2556.). กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2556, จาก กองจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ ผ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ: http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=441

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

พัชร สนั่นพัฒนพงศ์. (2555). การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางข้นโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เพิ่มศักดิ์ กาญจนบุตร. (2550). การกำจัดซีโอดี และสีของน้ำกากส่าโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มกับโพลิเมอร์ และถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เภสัชรัตน์ กชกรจารุพงศ์. (2550). การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งด้วยการบำบัดโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. (2547). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: แซน.อี 68 คอนซัลอิ้ง เอ็นจิเนียรสฺ จำกัด.

ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ. (2541). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

โรสนา กาซอ. (2555). การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์ม. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 11.

วาริท เจาะจิตต์. (2541). การศึกษาการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกคลอไรด์ และเบนโทไนท์ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระนุช บุญรุ่ง. (2553). การกำจัดสารอินทรีย์ และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศักดิ์ชัย ซื้อวัฒนานุกูร. (2539). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (2556). สถานการณ์ปาล์ม. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2557, จาก http://www.nstda.or.th/nac2013/download/presentation/NAC2013_Set2/CO-113-03/Kewalin%20.pdf

ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. (2557). วิชาการปาล์มน้ำมัน. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2557, จาก http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/oilpalm.html

สรนันท์ นิลตีบ และ เสาวรส หนูสุข. (2556). การลดสีและสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการกรองเร็ว. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินท์.

สราวุธ จริตงาม. (2545). กลศาสตร์ของดิน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สุจิตรา (เลิศพฤกษ์) รตนะมโน. (2555). ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2555, จาก รงควัตถุ: http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning50/FT320/pdf/06.pdf

สุปรีดา วัชรจิรโสภณ และ นันทนา ดาโอะ. (2554). รายงานวิจัยเรื่องการลดสารอินทรีย์และสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน - อัลตราฟิลเตรชัน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน). (2557). ปาล์มน้ำมัน (Oil palm). ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2557, จาก http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/controller/01-12.php

สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5 จังหวัดสงขลา. (2554). พืชเศรษฐกิจปาล์มน้ำมัน. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2557, จาก สถานการณ์การผลิตปาล์มน้ำมัน: http://www.sdoae.doae.go.th/plam/53/1.pdf

หนังสือพิมพ์เดลินิวส์หมวดเกษตร. (2556). แผนพัฒนาปี 2556 - 2560 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ดินดีสม เป็นนาสวน. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2557, จาก http://www.dailynews.co.th/Content/agriculture/134758 .

หัสลินดา บินมะแอ. (2548). การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเชื้อราทนร้อนที่ผลิตพอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อนุสิษฐ์ เกื้อกูล. (2012). คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศ. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2014, จาก คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศ: http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1202-%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88+12+%E0%B8%82%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%94%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A1?groupid=247

อรุณี ยูวะนิยม. (2558). การจัดการแก้ไขปัญหาดินเค็ม. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 10 เมษายน 2558, จาก http://www.ldd.go.th/Lddwebsite/web_ord/Technical/pdf/P_Technical03001_1.pdf

Abdelrasoul, A., Doan, H., & Lohi, A. (2013). Fouling in membrane filtration and remediation methods. Retrieved July 2015, 2, from http://dx.doi.org/10.5772/52370

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Ahmad, A. L., Chan, C. Y., Abdshukor, S. R., & Mashitah, M. D. (2008). Recovery of oil and carotenes from palm oil mill effluent (POME) . Journal chemical engineering, 383 - 386.

Ahmad, A. L., Chong, M. F., Bhatia, S., & Ismail, S. (2006). Drinking water reclamation from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. Desalination, 35 - 44.

Ahmad, A. L., Iamail, S., & Bhatia, S. (2003). Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. Desalination, 87 - 95.

Ahmad, A. L., Ismail, S., & Bhatia, S. (2005). Membrane treatment for palm oil mill effluent: effect of transmenbrane pressure and crossflow velocity. Desalination, 245 - 255.

Ahmad, A. L., Sumathi, S., & Hameed, B. H. (2006). Coagualtion of residues oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. Chemical engineering journal, 99 - 105.

Alriols, M. G., Tejado, A., Blanco, M., Mondragon, I., & Labidi, J. (2009). Agricultural palm oil tree residues as raw material for cellulose, lignin and hemicelluloses production by Ethylene glycol pulping process. Journal of chemical engineering, 106 - 114.

Amirtharajah, A., & Mill, K. M. (1982). Rapid - mix design for mechanism of alum coagulation. Jour. AWWA, 210 - 216.

APHA. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater: 21 st edition. Washington D.C.: American public health association Inc.

Arkhangelsky, E., Kuzmenko, D., & Git, V. (2007). Impact of chemical cleaning on properties and functioning of polyethersulfone membranes. Journal of Membrane Science, 176 - 184.

AWWA, & ASCE. (1990). Water treatment plant design. New York: McGraw Hill.

Baharuddin, A. S., Rahman, N. A., Shah, U. K., Hassan, M. A., Wakisaka, M., & Shirai, Y. (2011). Evaluation of pressed shredded empty fruit bunch (EFB) - palm oil mill effluent (POME) anaerobic sludge based compost using Fourier transform infrared (FTIR) and nuclear magnetic resonance (NMR) analysis. African Journal of Biotechnology, 8082 - 8089.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Balks, M. R., Mclay, C. D., & Harfoot, C. G. (1997). Determination of the progression in soil microbial response and change in soil permeability, following application of meat processing effluent to soil. Applied soil ecology, 109 - 116.

Bob Norman and Simon Chrismas. (2015). Retrieved 12 2, 2015, from Green palm sustainability: http://greenpalm.org/

Bourgeous, K., Tchobanoglous, G., & Darby, J. (1999). Performance evaluation of the ultrafiltration membrane system for wastewater reclamation. Department of civil and environmental engineering, University of California.

Bouwer , H. & Chaney , R. L. (1974). Land treatment of wastewater. New York: Academic Press.

Cabrera, F., Lopez, R., Martinez - Bordiu, A., Dupuy de Lome, E., & Murillo, J. M. (1996). Land treatment of olive oil mill wastewater. International biodeterioration and biodegradation, 215 - 225.

Carroll, T., King, S., Gray, S. R., & Boltom, B. A. (2000). The fouling of microfiltration membranes by NOM after coagulation treatment. Wat. Res., 2861 - 2866.

CBCLlimitedconsultingengineer. (2011). Study on characteristics and removal of natural organic matter in drinking water systems in Newfoundland and Labrador. Department of environment and conservation water management dicision.

Chapman, J. A., Correll, R. L., & Ladd, J. N. (1995). The removal of soluble organic carbon from synthetic winery wastewater be repeated application to soil. Aust. J. Grape wine Res, 76 - 85.

Chen, J., Li, Q., & Elimelech, M. (2004). In situ monitoring techniques for concentration polarization and fouling phenomena in membrane filtration. Advances in colloid and interface science, 83 - 108.

Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J. A., & Booksh, K. (2003). Fluorescence excitation - emission matrix regional integration to quantity spectra for dissolved organic matter. Environ. Sci. Technol, 5701 - 5710.

Christen, E. W., Quayle, W. C., Marcoux, M. A., Arienzo, M., & Jayawardance, N. S. (2010). Winery wastewater treatment using the land filter technique. Journal of environmental management, 1665 - 1673.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Christen, E. W., Quayle, W. C., Marcoux, M. A., Arienzo, M., & Jayawardane, N. S. (2010). Winery wastewater treatment using the land fillter technique. Journal of environmental management, 1665 - 1673.

Contreras, C. A., Sugita, S., & Ramos, E. (2006). Preparation of sodium aluminate from basic aluminium sulfate. The AZO djournal of materials online.

Das, B. (2008). Advanced soil machanics. London & New York: Taylor & Francis.

Davis, J. (2015). What To Do If Your Soil Is Too Alkaline. Retrieved July 26, 2015, from http://www.rodalesorganiclife.com/garden/what-do-if-your-soil-too-alkaline

DeDietrich Process systems. (2014). The effective technology for water purifi cation is polyaluminium chloride (PAC). Retrieved Janurary 2, 2014, from http://www.dedietrich.com/index.php?cmpref=67438&lang=en&module=media&action=Display

Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolyzing metal salts. Advances in colloid and interface science.

Duan, J., Geng, C., Li, X., Duan, Z., & Yang, L. (2015). The treatment performance and nutrient removal of a garden land treatment infiltration system receiving dairy farm wastewater. Agrilculture water management, 103 - 110.

Eckfelder, W. W., & Ford, D. L. (1970). Water pollution control experimental procedures for process design. New York: The Pemberton press.

Edzwald, J. K., & Benschoten, J. E. (1990). Aluminium coagulation of natural organic matter. Chemical water andwastewater treatment. Springer - Verlag, New York, 341 - 359.

Edzwald, K. J., & Tobiason, J. E. (1999). Enhance coagulation: USA requirement and a broader view. Wat. Sci. Technol, 63 - 70.

Edzwald, K. J., Bottero, J. Y., Ives, K. J., & Klute, R. (1998). Treatment process selection for particle removal. American water association research foundation.

Egbu, P. (2000). Management of palm oil mill effluents. Research project department of chemical engineering. University of Port Harcourt, Nigeria, 177 - 182.

Elbe, J., & Schwartz, S. J. (1996). Colorants In Food Chemistry. New York: Marcel Dekker.

Folkman, Y., & Wachs, A. M. (1970). Filtration of chlorella through dune-sand. Journal of the Sanitary Engineering Division, 675 - 690.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Franken, A. C. (2009). Prevention and control of membrane fouling: practical implications and examining recent innovations. DSTI.

Gabelich, C. J., Yun, T. I., Coffey, B. M., & Suffet, I. H. (2002). Effect of aluminum sulfate and ferric chloride coagulation residuals on polyamide membrane performance. Desalination, 15 - 30.

Gebbie, P. (2001). Using polyaluminium coagulation in water treatment. Annual water industry engineers and operators, 39 - 47.

Gilbert, R. G., Gerba, C. P., Rice, R. C., Bouwer, H., Wallis, C., & Melinick, J. L. (1976). Virus and baceria removal from wastewater by land treatment. Appled and environmental microbiology, 333 - 338.

Gonzaflez-Vila, F. J., Verdejo, T., Del Rio , J. C., & Marlin, F. (1995). Accumulation of hydrophobic compounds in the soil lipidic and humic fractions as result of a long term land treatment with Olive oil mill effluents (Alpechin). Chemosphere, 3681 - 3686.

Hassan, M. A., & Puteh, M. H. (2007). Pre - treatment of palm oil mill effluent (POME): A comparison study using chitosan and alum. Malaysian Journal of civil engineering, 38 - 51.

Hassink, J., Whitmore, A. P., & Kubat, J. (1997). Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. Eur. J. of Ag, 189-199.

Hermia, J. (1952). Constant pressure blocking filtration law: Application to Power - Law Non - Newtonoin fluids. Transaction of the institution of chemicl engineers., pp. 183 - 187.

Holman, S. R., & Ohlinger, K. N. (2007). An evaluation of fouling potential and methods to control fouling in microfiltration membranes for secondary wastewater effluent. Water environmental federation.

Howe, K. J., & Clark, M. M. (2002). Coagulation pretreatment for membrane filtration. AWWA research foundation .

Idris, M. A., Jami, M. S., & Muyibi, S. A. (2010). Tertiary treatment of biologically treated palm oil mill effluent (POME) using UF membrane system: effect of MWCO and transmembrane pressure. International journal of chemical and environmental egineering.

Igwe, J. C., & Onyegbado, C. C. (2007). A review of palm oil mill effluent (POME) water treatment. Global journal of environmental research, 54 - 62.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Kongnoo, A., Suksaroj, T., Intharapat, P., Promtong, T., & Suksaroj, C. (2012). Decolorization and organic removal from palm oil mill effluent by Fenton's process. Environmental engineering science, 855 - 859.

Laohaprapanon, T., Prasertsan, P., & Kittikun, A. H. (2005). Physical and chemical separation of oil and suspended solid from palm oil mill effluent. Asian J. Energy Environ, 39 - 55.

Lee, F. (1983). Basic food chemistry. Westport: The AVI Pub. Co. Inc.

Lenntech. (2014). Silt Density Index - SDI. Retrieved Jane 1, 2014, from Water Treatment Solutions: http://www.lenntech.com/sdi.htm

Limkhuansuwan, V., & Chaiprasert, P. (2010). Decolorization of molasses melanoidins and palm oil mill effluent phenolic compounds by fermentative lactic acid bacteria. Journal of environmental science, 1209 - 1217.

Majouli, A., Tahiri, S., Younssi, S. A., Loukili, H., & Albizane, A. (2012). Treatment of effluents coming from beamhouse section of tannery rane by microfiltration through Cordierite/Zirconia and Alumina tubular ceramic memb. Journal Mater. Environ. Sci., 808 - 815.

Matejkavs, S., & Simon, T. (2012). Application of FTIR spectroscopy for evaluation of hydrophobic/ hydrophilic organic components in arable soil. Plant soil environ, 192 - 195.

Matias, M. C., Orden, M. U., Sanchez, C. G., & Urreaga, J. M. (2000). Comparative spectroscopic study of the modification of cellulose materials with different coupling agents. Journal appl. Polym. Sci, 256 - 266.

Mclnture, J. F., Foley, R. T., & Brown, B. F. (1981). Infrared spectra of aluminium salt solutions. Washington D.C.: Department of chemictry, The American University.

Metcalf, & Eddy. (2004). Wastewater engineering treatment and reuse. New York: McGraw - Hill.

Mousavinezhad, M., Rezazadeh, M., Golbabayee, F., & Sadati, E. (2015). Land treatment methods a review on available methods and its ability to remove pollutants. Orient J Chem.

Neoh, C. H., Yahya, A., Adnan, R., Majid, Z. A., & Ibrahim, Z. (2012). Optimization of decolorization of palm oil mill effluent (POME) by growing cultures of Aspergillus fumigatus using response surface methodology. Environmental science and pollution research, 2912 - 2923.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Norulaini, N., Zuhair, A., Hakimi, M., & Omar, M. (2001). Chemical coagulation of settleable solid - free palm oil mill effluent (POME) for organic load reduction. J. Indust. Technol, 55 - 72.

Ohimain, E. I., Daokoru-Olukole, C., Izah, S. C., Eke, R. A., & Okonkwo, A. C. (2012). Microbiology of Palm Oil Mill Effluents. J. Microbiol. Biotech, 852 - 857.

OhioEPA. (2015). Using Soil Classification & Description Data . Retrieved march 15, 2015, from https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAAahUKEwjTvo_Qo_jHAhVO1I4KHbbZBOc&url=http%3A%2F%2Fepa.ohio.gov%2Fportals%2F30%2Fvap%2Fdocs%2Ftraining%2FSpring%25202015%2520CP%2520Coffee%2FSoil%2520Class%2520VAP

O'Melia, C. R., Gray, K., & Yao, C. (1989). Polymeric inorganic coagulants. American Water Works Association Research Foundation.

Owen, D. M., Amy, G. L., & Chowdhury, Z. K. (1993). Characterization of natural organic matter and its relationship to treatability. U.S.A.: AWWA research foundation .

Pernitsky, D. J. (2015). Coagulation 101. Retrieved april 1, 2015, from P:\OFFICE\Conferences\2003TechTrans\Dave P\DAVE_paper.doc

Pernitsky, D. J., & Edzwald, J. K. (2006). Selection of alum and polyaluminium coagulation: principles and applications. Journal of water supply : research and technology, 121 - 141.

Pettit, R. E. (2004). Organic matter, humus, humate, humic acid, fulvic acid and humin: their inportance in soil fertility and plant health. Emritus Associate professor Texas A&M University.

Polprasert, C. (2007). Organic waste recycling. IWA Publishing .

Polprasert, C. (2007). Organic waste recycling technology and management. Bangkok, Thailand.

Rabiller - Baudry, M., Gouttefangeas, F., Lannic, J. L., & Rabiller, P. (2012). Coupling of SEM - EDX and FTIR - ATR to (quanlitatively) investigate organic fouling on porous organic composite membranes. Current microscopy contributions to advances in science and technology, 1066 - 1076.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Rakamthong, C., & Prasertsan, P. (2011). Decolorization and phenol removal of anaerobic palm oil mill effluent by phanerochate chrysosporium ATCC 24725. TIChE international conterence, Songkhla Thailand.

Rice, R. C. (1974). Soil clogging during infiltration of secondary effluent. Water pollution control federation, 708 - 716.

Robertson, A. H., Hill, H. R., & Main, A. M. (2013). Analysis od soil in the field using portable FTIR. International workshop " Soil spectroscopy: the present and future of soil monitoring".

Rosas, I., Collado, S., Gutierrez, A., & Diaz, M. (2014). Fouling mechanisms of Pseudomonas putida on PES microfiltration membranes. Journal of membrane science, 27 - 33.

Rupani, P. F., Singh, R. P., Ibrahim, M. H., & Esa, N. (2010). Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: vermicomposting as sustainable practice. World applied sciences Journal, 70 - 81.

Saifuddin, N., & Dinara, S. (2011). Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using magnetic chitosan. E - Journal of chemitry, 67 - 78.

Salihu, A., & Alam, Z. (2012). Palm oil mill effluent: a waste or a raw material. Journal of Applied Sciences Research, 446 - 473.

satorius. (2015, July 21). Polyethersulfone (PES) Membrane Filter 15406--47------N. Retrieved September 1, 2015, from satorius: https://www.sartorius.com/en/product/product-detail/15406-47-n/

Shah, R. S., & Singh, P. K. (2004). Treatment of palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. Chemical engineering department, University of Malaya.

Shin, H. S., Monsallier, J. M., & Choppin, G. R. (1999). Spectroscopic and chemical characterizations of molecular size dfractionated humic acid. Talanta 50.

Silverstein, R. M., Bassler, G. C., & Morrill, T. C. (1981). Characteristic IR absorption frequencies of organic functional groups. Retrieved April 5, 2014, from http://www2.ups.edu/faculty/hanson/Spectroscopy/IR/IRfrequencies.html

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Silverstein, R. M., Bassler, G. C., & Morrill, T. C. (2014.). Characteristic IR absorption frequencies of organic functional groups. Retrieved April 5, 2014, from http://www2.ups.edu/faculty/hanson/Spectroscopy/IR/IRfrequencies.html

Smith, J. (1976). Treatment of potato processing wastewater on agriculture land. Journal of environmental quality, 113 - 116.

Soleimaninanadegani, M., & Mansh, S. (2014). Enhancement of Biodegradation of Palm Oil Mill Effluents by Local Isolated Microorganisms. International Scholarly Research Notices, 1 - 8.

Spinette, R. F. (2008). Fouling of a hydrophobic microfiltration membrane by algae and algal organic matter: mechanisms and prevention. Baltimore.

Stevenson, F. J. (1982). Humus chemitry genesis, compostion, reaction. John Wiley and Sons.

Sulaiman, N. N., & Ling, C. K. (2004). Membrane ultrafiltration of treated palm oil mill effluent (POME). Journal technology, 113 - 120.

Swietlik, J., & Sikorska, E. (2005). Characterization of natural organic matter fractions by high pressure size - exclusion chromotography, specific UV absorbance and total luminescence spectroscopy. Polish Journal of environmental syudies, 145 - 153.

SwissStandardSN670010b. (1999). Characteristic coefficients of soil . Association of Swiss Road and Traffic Engineers.

Taebi, A., & Droste, R. L. (2008). Performance of an overland flow system advanced treatment of wastewater plant effluent. Journal of environmental management, 688 - 696.

Tzanakakis, V. E., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2007). Performance of slow rate systems for treatment of domestic wastewater. Water science and technology, 139 - 147.

U.S.EPA. (1976). Land treatment of municiple wastewater effluents. Design factor I, EPA - 625/4-76-010. Washington, D.C.: U.S. Environmental protection agency.

U.S.EPA. (1981). Process design manual for land treatment of municiple wastewater. EPA - 625/1-81-013. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental protection agency.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Velaa, M. C., Blancoa, S. A., Garciaa, J. L., & Rodriguez, E. B. (2008). Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG. Separation and purification technology, 489 - 498.

Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of color from textile wastewater. Journal of environmental management, 154 - 168.

Wah, W. P., Sulaiman, N. M., Nachiappan, M., & Varadaraj, B. (2002). Pre - treatment and membrane ultrafiltration using treated palm oil mill effluent (POME). Songklanarin J. Sci. Technol, 891 - 898.

Wang, C. C., Shang, C., Chen, G., & Zhu, X. (2013). Mechanisms of nC60 removal by the alum coagulation - flocculation - sedimentation process. Journal of colloid and interface science, 213 - 219.

Wang, J., Guan, J., Santiwong, S. R., & Waite, T. D. (2008). Characteriztion of floc size and structure under different monomer and polymer coagulants on microfiltration membrane fouling. Journal of membrane science, 132 - 138.

Wang, L. K., Hung, Y. T., & Shammas, N. K. (2004). Physicochemical treatment processes. Handbook of environmental engineering.

Wang, Y., Xu, X., Jegatheesan, V., & Gao, B. (2013). Effect of coagulation on the foulinng and performance of ultrafiltration (UF) membrane. Desalination and water treatment, 32 - 37.

West, T. R. (1995). Geology applied to engineering. Prentice Hall.

Wong, K. K. (1980). Application of ponding systems in the treatment of palm oil mill and rubber mill effluents. Pertanika, 133 - 141.

Wu, T. Y., Mohammad, A. W., Jahim, J. M., & Anuar, N. (2007). Palm oil mill effluent (POME) treatment and bioresource recovery using ultrafiltration membrane: Effect of pressure on membrane fouling. Biochemical engineering, 309 - 317.

Wu, T. Y., Mohammad, A. W., Jahim, J. M., & Anuar, N. (2010). Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME) through end - of - pipe processws. Journal of environmental management, 1467 - 1490.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Yang, H., Xiao, J., Gamal El - Din, M., Buchanan, I. D., Bromley, D., & Ikehata, K. (2010). Soil - based treatment of partially treated liquid swine manure. Environmental technology, 59 - 70.

Yejian, Z., Li, Y., Xiangli, Q., Lina, C., Xiangjun, N., Zhijian, M., et al. (2008). Integration of biological method and membrane technology in treating palm oil mill effluent. Journal of environmental sciences, 558 - 564.

Zaker, Y., Hossain, M. A., Ali, M., Islam, M. S., & Islam, T. S. (2013). Characterization of sand fractionated from Bijoypur Soil, Bangladesh and its application as an adsorbent. Research journal of chemical sciences, 90 - 94.

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

ตารางที่ ก. 1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 mg/L หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 mg/L ● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 mg/L หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 mg/L.
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 mg/L หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 mg/L
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H2S)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 mg/L
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 mg/L หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 mg/L
9. ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด

ตารางที่ ก. 1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 °C (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 mg/L หรือแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 mg/L
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 mg/L หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 mg/L
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 mg/L
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)	
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 mg/L
โครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเล้นท์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 mg/L
โครเมียมชนิดไตรวาเล้นท์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 mg/L
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 mg/L
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 mg/L
แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
ตะกั่ว (Pb)	ไม่ เกิน 0.2 mg/L
นิคเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 mg/L
อาร์เซนิค (As)	ไม่เกิน 0.25 mg/L
เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 mg/L
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 mg/L

ที่มา: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (2539)

ภาคผนวก ข

การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตารางที่ ข. 1 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้ม ควบคุมพีเอชในช่วง 5.5 – 6.5

ความเข้มข้น (g/L)	ความขุ่น (NTU)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	ซีโอดี (mg/L)
1	79.6	135	421.05
1.5	67.9	92.5	392.98
2	37.5	55	308.77
2.5	25.6	30	282
3	7.26	27.5	254
3.5	4.75	25	250
4	5.13	27.3	259
5	8.99	30.7	268
6	7.11	37.5	296
7	11.3	42.5	296
8	9.22	57.5	296

ตารางที่ ข. 2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ควบคุมพีเอชในช่วง 6 - 7

ความเข้มข้น (g/L)	ความขุ่น (NTU)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	ซีโอดี (mg/L)
1	23.9	40	392.98
1.5	20.9	40	350
2	21	40	336.84
2.5	14	35	308.77
3	12.7	35	280
3.5	5.32	32.5	252
4	3.51	25	244.56
4.5	3.38	22.5	236.06
5	3.25	21	218
5.5	3.83	28.5	224
6	2.94	27.5	224
7	2.38	30	224
8	4.53	28	224

ตารางที่ ข. 3 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มที่ความเข้มข้น 3.5 g/L

พีเอช	ความขุ่น (NTU)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	ซีโอดี (mg/L)
4.5	13.7	41	253.29
5	3.79	35	243.75
5.5	3.75	21	236.06
6	12.5	25	238.16
6.5	62.5	25	288.52

ตารางที่ ข. 4 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 g/L

พีเอช	ความขุ่น (NTU)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	ซีโอดี (mg/L)
5.5	8.97	63.3	262.29
6	3.85	35	236.06
6.5	3.10	20	209.83
7	4.12	42.3	236.06
7.5	6.6	45	236.06
8	7.93	51	262.29

ภาคผนวก ค

การจำแนกดินในสวนปาล์ม

ตารางที่ ค. 1 การจำแนกดินตามขนาดเม็ดดิน

ความลึกดิน (cm)	ร้อยละดินเหนียว	ร้อยละดินตะกอน	ร้อยละดินทราย
0 - 20	16.16	11.00	72.84
20 - 40	15.31	15.06	69.93
40 - 60	13.71	10.60	75.69
60 - 80	14.27	9.64	76.10
80 - 100	16.04	8.46	75.50
เฉลี่ย	15.10	10.95	74.01

ตารางที่ ค. 2 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 0 - 20 cm

sieve NO.	น้ำหนักดิน (g)	ร้อยละดินค้าง	ร้อยละดินผ่าน
4	1.03	0.3	99.7
10	6.42	2.1	97.5
20	15.48	5.1	92.44
40	22.11	7.3	85.15
100	130.84	43.1	42.03
200	41.66	13.7	28.29
L.L.	21.9		
P.I.	2.6		

ตารางที่ ค. 3 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 20 - 40 cm

sieve NO.	น้ำหนักดิน (g)	ร้อยละดินค้าง	ร้อยละดินผ่าน
4	1.91	0.61	99.71
10	8.38	2.68	96.71
20	21.43	6.85	89.86
40	30.97	9.90	79.95
100	114.73	36.69	43.26
200	35.74	11.43	31.83
L.L.	19.7		
P.I.	2.2		

ตารางที่ ค. 4 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 40 - 60 cm

sieve NO.	นน.ดิน (g)	ร้อยละดินค้าง	ร้อยละดินผ่าน
4	0.16	0.05	99.95
10	2.72	0.88	99.06
20	15.72	5.11	93.96
40	22.91	7.44	86.51
100	103.57	33.66	52.85
200	36.29	11.79	41.06
L.L.	19.7		
P.I.	3.3		

ตารางที่ ค. 5 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 60 - 80 cm

sieve NO.	น้ำหนักดิน (g)	ร้อยละดินค้าง	ร้อยละดินผ่าน
4	1	0.33	99.67
10	5.23	1.73	97.94
20	16.5	5.47	92.47
40	24.41	8.09	84.38
100	100.56	33.32	51.06
200	37.66	12.48	38.58
L.L.	18.3		
P.I.	3		

ตารางที่ ค. 6 ผลการร่อนผ่านตะแกรง ที่ดินลึก 80 - 100 cm

sieve NO.	น้ำหนักดิน (g)	ร้อยละดินค้าง	ร้อยละดินผ่าน
4	0.93	0.30	99.70
10	7.81	2.52	97.19
20	23.16	7.46	89.73
40	31.91	10.28	79.45
100	105.72	34.05	45.40
200	31.61	10.18	35.22
L.L.	15.9		
P.I.	3.4		

ตารางที่ ค. 7 คุณสมบัติของดิน

ความลึกของชั้นดิน (cm)	พีเอช	ความหนาแน่นของดิน (g/cm^3)	ร้อยละความชื้น	ความถ่วงจำเพาะ	ช่องว่าง	ความพรุน
0 - 20	8.14	2.03	16.2	2.63	0.61	37.8
20 - 40	7.89	2.1	19.02	2.64	0.65	40
40 - 60	8.08	2.1	20.2	2.64	0.67	40.2
60 - 80	8.24	2.2	21.3	2.62	0.63	38.8
80 - 100	7.95	2.2	23.3	2.65	0.67	40.2

ตารางที่ ค. 8 ธาตุอาหารในดิน

ความลึกของดิน (cm)	ร้อยละอินทรียวัตถุ	ร้อยละอินทรีย์คาร์บอน	ร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมด	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	โพแทสเซียม (mg/kg)	การแลกเปลี่ยนประจุ (me/100g soil)
0 - 20	2.33	1.35	0.14	1,056.35	538.16	5.25
20 - 40	1.94	1.13	0.11	962.27	507.01	4.16
40 - 60	1.23	0.72	0.06	553.86	465.97	3.31
60 - 80	0.92	0.53	0.03	325.21	417.82	2.73
80 - 100	0.59	0.34	0.04	207.37	444.28	2.44

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์หาค่าฟลักซ์ของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

ตารางที่ ง. 1 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar

เวลา (min)	น้ำหนัก permeate (g)	ฟลักซ์ (L/m^2-hr)
1	9.2	398.43
2	3.3	142.91
3	2.4	103.94
4	2	86.61
5	1.8	77.95
6	1.4	60.63
7	1.4	60.63
8	1.4	60.63
9	1.2	51.97
10	1.04	45.04
12	0.92	39.84
14	0.8	34.86
16	0.5	21.65
18	0.425	18.41
20	0.425	18.41
22	0.375	16.24
24	0.375	16.24
37	0.3	12.99
เฉลี่ย	29.26	70.41

ตารางที่ ง. 2 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar

เวลา (min)	**น้ำหนัก permeate (g)**	**ฟลักซ์ (L/m^2-hr)**
1	289	12515.86
2	102	4417.36
3	68	2944.91
4	58.1	2516.16
5	48	2078.76
6	46.1	1996.47
7	37.9	1641.35
8	23	996.07
9	20	866.15
10	27	1169.30
11	26	1125.99
12	25	1082.69
13	23	996.07
14	26	1125.99
15	24.4	1056.70
16	29.2	1264.58
17	19.8	857.49
18	18.6	805.52
19	18	779.53
20	17.8	770.87
21	17	736.23
22	16.4	710.24
23	16.5	714.57
24	15.9	688.59
25	15.4	666.93
26	14.4	623.63
27	15.9	688.59
28	14.6	632.29
29	15	649.61
30	11.5	498.04
31	15.7	679.93
32	14.9	645.28

ตารางที่ ง. 2 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสารส้ม ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar (ต่อ)

เวลา (min)	น้ำหนัก permeate (g)	ฟลักซ์ (L/m^2-hr)
33	14.4	623.63
34	14	606.30
35	13.8	597.64
40	2.656	115.02
เฉลี่ย	1174.9	1413.45

ตารางที่ ง. 3 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar

เวลา (min)	น้ำหนัก permeate (g)	ฟลักซ์ (L/m^2-hr)
1	340	14724.54
2	72	3118.14
3	66	2858.29
4	61	2641.76
5	57	2468.53
6	52	2251.99
7	33	1429.15
8	30	1299.22
9	29	1255.92
10	29	1255.92
11	29	1255.92
12	27	1169.30
13	27	1169.30
14	28	1212.61
15	26	1125.99
16	26	1125.99
17	26	1125.99
18	26	1125.99
19	11.4	493.71
20	14.6	632.29
21	14	606.30
22	15	649.61
23	14	606.30

ตารางที่ ง. 3 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar (ต่อ)

เวลา (min)	**น้ำหนัก permeate (g)**	**ฟลักซ์ (L/m^2-hr)**
24	14	606.30
25	16	692.92
30	15.2	658.27
40	14.1	610.64
เฉลี่ย	1112.3	1784.11

ตารางที่ ง. 4 การกรองน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่บำบัดด้วยดินอัตรา 3 cm/week ผ่านเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน 0.45 μm ความดัน 1 bar

เวลา (min)	**น้ำหนัก permeate (g)**	**ฟลักซ์ (L/m^2-hr)**
1	234	10133.95
2	79	3421.29
3	54	2338.60
4	45	1948.84
5	31	1342.53
6	25	1082.69
7	18	779.53
8	12	519.69
9	11	476.38
10	13	563.00
15	11	476.38
20	11	476.38
เฉลี่ย	544	1963.27

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาววันวิจิตร ทิมฐาน
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5510120044
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศิษย์ก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี พ.ศ. 2544

ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. - อุตสาหกรรม (MAG WINDOW I)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Wanwijit Timthan, Charongpun Musikavong and Chaisri Suksaroj. (2014). Pretreatment of Palm Oil Mill Effluent for Water Reclamation. International Conference on Science, Technology, Engineering and Management. November 8 2014, Quality Inn Marlowe, Singapore.

วันวิจิตร ทิมฐาน จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ ชัยศรี สุขสาโรจน์. (2557). การลดกลุ่มสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน. การประชุมสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13. ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ วันที่26 – 28 มีนาคม 2557.