การกำจัดสีรีแอคทีฟด้วยกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

วิทยานิพนธ์

ของ

กฤษณะ ธรรมชัย

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

มีนาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การกำจัดสีรีแอคทีฟด้วยกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

วิทยานิพนธ์

ของ

กฤษณะ ธรรมชัย

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

มีนาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Removal of Reactive Dye Using Coagulation and Ultrafiltration Process

Krissana Thammachai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Environmental Technology)
March 2022
Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกฤษณะ ธรรมชัย แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. พลกฤษณ์ จิตร์โต)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร. ชฤพนธ์ เจริญสุข)

....กรรมการ

(ผศ. ดร. ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์)

....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุนันทา เลาวัณย์ศิริ)

....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รศ. ดร. สุพัฒน์พงษ์ มัตราช)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

....	....
(รศ. ดร. อดิศักดิ์ สิงห์สีโว)	(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การกำจัดสีรีแอคทีฟด้วยกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน
ผู้วิจัย กฤษณะ ธรรมชัย
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชฤพนธ์ เจริญสุข
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟโทนสีแดง 195 (RR195) และศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันในการกำจัดสี RR195 ในการศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นและปริมาณของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) โดยใช้วิธี Jar test ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ได้ทำการศึกษาความสามารถในการซึมผ่าน, การกำจัดสี, การกำจัดของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (TDS), การกำจัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) และผลของความดันในการเดินระบบ ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดสีได้รับอิทธิพลจากความแปรผันของพีเอชเริ่มต้น ประสิทธิภาพของการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PAC เพิ่มขึ้น การกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ PAC อยู่ระหว่าง 500-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณของ PAC 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการกำจัดสีลดลง นอกจากนี้ การกำจัดสีสูงสุดได้ร้อยละ 99.47 ที่ปริมาณของ PAC 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชเริ่มต้น 9 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การกำจัดสีลดลงเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น ความดันในการเดินระบบที่เหมาะสมเท่ากับ 10 แรงปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่สภาวะเหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน สามารถกำจัดสี, TDS และ EC ได้ร้อยละ 99.66-99.78, 0.05-0.22 และ 0.07-0.11 ตามลำดับ ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสี RR195 คือปริมาณของ PAC 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้น 9 และกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี RR195 ยกเว้น TDS และ EC

คำสำคัญ : กระบวนการสร้างตะกอน, เยื่อกรอง, สีรีแอคทีฟ, การบำบัดน้ำเสีย

TITLE	Removal of Reactive Dye Using Coagulation and Ultrafiltration Process		
AUTHOR	Krissana Thammachai		
ADVISORS	Charuepon Charoensuk , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	**MAJOR**	Environmental Technology
UNIVERSITY	Mahasarakham University	**YEAR**	2022

ABSTRACT

This research aims to examine the optimal conditions to coagulate a Reactive Red 195 dye (RR195) and the efficiency of the combined coagulation and ultrafiltration process on RR195 removal. In this experimental study, the effect of initial pH and Polyaluminium Chloride (PAC) dosages were studied using the jar test. The combined process was studied permeability, colour removal, TDS removal, EC removal and the effect of operating pressure. The result showed that the efficiency of colour removal was influenced by initial pH variations. By increasing PAC dosage, the efficiency of colour removal increased. The colour removal increased with the increase of PAC dosage from 500 to 3,000 mg/L, while the colour removal decreased at a PAC dosage of 5,000 mg/L. Moreover, the highest colour removal was 99.47% at a PAC dosage of 3000 mg/L and initial pH 9. By increasing operating pressure, the permeate flux increased. Conversely, the increase of operating pressure led to the decrease of colour removal. The optimal operating pressure was 10 psi. The colour, TDS and EC removal of the optimal condition of the combined process were 99.66-99.78%, 0.05-0.22% and 0.07-0.11%, respectively. These results suggest that the optimal condition to coagulate RR195 is PAC dosage of 3,000 mg/L and initial pH 9. This combined process is an effective process to remove RR195 except TDS and EC.

Keyword : Coagulation, Membrane, Reactive dye, Wastewater treatment

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก อาจารย์ ดร.ชฤพนธ์ เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กฤษณะ ธรรมชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ซ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูปภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา 3

บทที่ 2 4

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล 4

2.1 เส้นใยฝ้าย 4

2.2 สีรีแอคทีฟ 5

2.3 น้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม 9

2.4 กระบวนการสร้างตะกอน 12

2.5 ระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน 19

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25

บทที่ 3 27

วิธีการศึกษา 27
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 27
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 27
3.3 การเตรียมน้ำสีรีแอคทีฟที่ใช้ในการทดลอง 27
3.4 การติดตั้งชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน 28
3.5 การดำเนินการวิจัย 28
3.6 การวิเคราะห์ 31
บทที่ 4 34
ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา 34
4.1 คุณลักษณะของน้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 34
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ 35
4.3 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility test) 38
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน 39
บทที่ 5 51
สรุปผลการศึกษา 51
5.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนของสีรีแอคทีฟ 51
5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบกอัลตร้าฟิลเตรชัน 51
5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน 52
5.4 ข้อเสนอแนะ 53
บรรณานุกรม 54
ประวัติผู้เขียน 60

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ร้อยละปริมาณของสีย้อมที่ไม่ถูกตรึงกับเส้นใยระหว่างกระบวนการย้อม 8

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม 10

ตารางที่ 3 ลักษณะของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม 11

ตารางที่ 4 ลักษณะของน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย 12

ตารางที่ 5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแต่ละชนิด....................................... 19

ตารางที่ 6 การจำแนกชนิดของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรอง 20

ตารางที่ 7 คุณลักษณะของน้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 34

ตารางที่ 8 ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการกำจัดสีสีรีแอคทีฟ 36

ตารางที่ 9 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละของการกำจัดสี... 37

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปภาพ 1 โครงสร้างของเซลลูโลสและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเซลลูโลส 4

รูปภาพ 2 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ โทนสีน้ำเงิน 109 5

รูปภาพ 3 ปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอโรไตรอะซีนกับเซลลูโลสและน้ำ 6

รูปภาพ 4 ปฏิกิริยาระหว่างไวนิลซัลโฟนกับเซลลูโลสและน้ำ.. 6

รูปภาพ 5 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ โทนสีดำ 5.. 9

รูปภาพ 6 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 9

รูปภาพ 7 สารมลพิษที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนของการฟอกย้อม.. 10

รูปภาพ 8 ภาพประกอบของกระบวนการสร้างตะกอนในการกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในรูปของ
คอลลอยด์ 13

รูปภาพ 9 ประจุไฟฟ้า 2 ชั้น ของอนุภาคคอลลอยด์... 14

รูปภาพ 10 พลังงานดึงดูดและพลังงานผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ตามระยะทาง 15

รูปภาพ 11 การแบ่งประเภทของสารสร้างตะกอน... 17

รูปภาพ 12 ลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบปิดตาย 21

รูปภาพ 13 กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบไหลตามขวาง.. 22

รูปภาพ 14 ลักษณะการเกิดฟาวลิงบนเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน 24

รูปภาพ 15 ชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน 28

รูปภาพ 16 การติดตั้งชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชันกับถังปฏิกรณ์ 28

รูปภาพ 17 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 34

รูปภาพ 18 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละของการกำจัดสี.. 35

รูปภาพ 19 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ช่วงเวลาต่างๆ... 39

รูปภาพ 20 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ........................... 40

รูปภาพ 21 ค่าร้อยละของการกำจัดสีหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ.................. 41

รูปภาพ 22 ลักษณะของผิวหน้าเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน (ก) เยื่อกรองสะอาด, ... 41

รูปภาพ 23 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ............. 42

รูปภาพ 24 ค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ 43

รูปภาพ 25 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว............................. 44

รูปภาพ 26 ค่าร้อยละของการกำจัดสีของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว............................. 45

รูปภาพ 27 ลักษณะของผิวหน้าเยื่อกรองของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน (ก) เยื่อกรองสะอาด, (ข) เยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว .. 46

รูปภาพ 28 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 47

รูปภาพ 29 ค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.. 49

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สีรีแอคทีฟ เป็นสีย้อมที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมย้อมสีสิ่งทอเป็นเวลาหลายปี เนื่องจากให้สีสันสดใส, มีราคาถูก, มีความคงทนต่อการซักสูง และใช้งานง่าย โดยทั่วไปจะใช้สำหรับย้อมสีเส้นใยฝ้ายและเซลลูโลส สีรีแอคทีฟทำปฏิกิริยากับฝ้ายหรือเส้นใยเซลลูโลสโดยการสร้างพันธะโควาเลนต์ แต่ข้อเสียหลักของสีย้อมนี้ คือ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ (Dye hydrolysis) สีย้อมที่ใช้ประมาณร้อยละ 20-50 ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย (Gita et al., 2017) ทำให้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสีสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ เช่น การบดบังแสง ซึ่งเป็นการลดการส่องผ่านของแสงผ่านน้ำ ส่งผลต่อกิจกรรมการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำลดลง นำไปสู่การขาดออกซิเจนและกระทบต่อควบคุมวัฏจักรทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และยังส่งผลต่อความสวยงาม (Hassaan et al., 2017) นอกจากนี้ หมู่โครโมฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบของสีรีแอคทีฟ เช่น อะโซ, แอนทราควิโนน, ไตรเอริลมีเทน, พทาโลไซยานิน, ฟอร์มาซาน และออกซาซิน (Balkaya & Büker, 2017) สีย้อมที่มีหมู่อะโซจะมีวงแหวนเอมีนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายเป็น 1,4-ไดอะมิโนเบนซีน และ 1,4-ฟีนิลีนไดอะมีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Jadhav et al., 2016) ดังนั้น จึงควรเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ

กระบวนการสร้างตะกอนและร่วมตะกอน เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการนี้มีความเรียบง่ายและประสิทธิผล (Teh et al., 2016) ข้อดีหลักของกระบวนการนี้คือ การกำจัดโมเลกุลของสีย้อมออกจากน้ำเสีย โดยไม่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกลายเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่เป็นพิษ (Zonoozi et al., 2009) สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป ได้แก่ สารสร้างตะกอนที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น สารส้ม และสารสร้างตะกอนที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์และเฟอร์ริกซัลเฟต นอกจากนี้ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ได้กลายเป็นสารสร้างตะกอนที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีที่เหนือกว่าสารสร้างตะกอนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป (Wei et al., 2015)

กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรอง เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการนี้ สามารถแยกโมเลกุลของสีออกจากน้ำโดยอาศัยการกรองผ่านเยื่อกรอง ทำให้ได้น้ำดีและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการลดการใช้น้ำและค่าใช้จ่ายของโรงงาน (Alventosa-deLara et al., 2012) กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองที่นิยมใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม สามารถแบ่งได้ 3 ระบบ ได้แก่ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse

Osmosis), นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และอัลตร้าฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ซึ่งระบบที่ได้รับความนิยม ได้แก่ ระบบออสโมซิสย้อนกลับและระบบนาโนฟิลเตรชัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสี เพราะเยื่อกรองมีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้โมเลกุลของสีไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ แต่การมีรูพรุนขนาดเล็ก เป็นผลให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำต่ำ ทำให้ต้องใช้ความดันสูงในการเดินระบบ ในขณะที่ระบบอัลตร้าฟิวเตรชันไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสี เพราะเยื่อกรองมีรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้โมเลกุลของสีสามารถผ่านเยื่อกรองได้ แต่การมีรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้สามารถใช้ความดันต่ำในการเดินระบบ โดย (Aouni et al., 2012) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟระหว่างเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันกับเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน พบว่า เยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันที่ใช้ความดันอยู่ในช่วง 2-7 บาร์ สามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้น้อยกว่าร้อยละ 80 ในขณะที่เยื่อกรองนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ความดันอยู่ในช่วง 4-15 บาร์ สามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้มากกว่าร้อยละ 90 แสดงให้เห็นว่าเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟต่ำกว่าเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน

จะเห็นได้ว่า เยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสีรีแอคทีฟ แต่มีข้อดีคือใช้ความดันต่ำในการเดินระบบ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายถูกกว่าเยื่อกรองออสโมซิสย้อนกลับและนาโนฟิลเตรชัน ทำให้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันมากขึ้น (Alventosa-deLara et al., 2012; Aryanti et al., 2017; Chen et al., 2015; Ma et al., 2017) โดย (Jiang et al., 2018) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟและสีไดเร็กท์ด้วยเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันที่มีน้ำหนักโมเลกุลถูกตัดออก (Molecular weight cut off, MWCO) อยู่ระหว่าง 6,050-17,530 ดัลตัน พบว่า เยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองเท่ากับ 7,310 ดัลตัน สามารถกำจัดสีรีแอคทีฟและสีไดเร็กท์ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการลดขนาดรูพรุนของเยื่อกรอง ในทางกลับกัน ผู้วิจัยคาดว่า หากทำให้โมเลกุลของสีรวมตัวกันเป็นตะกอนสีขนาดใหญ่ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน จะทำให้ตะกอนสีไม่สามารถผ่านเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชัน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชันในการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้น ในการศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟจากน้ำสีด้วยระบบกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนของสีรีแอคทีฟ และศึกษาประสิทธิภาพของระบบกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชันในการกำจัดสีรีแอคทีฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนของสีรีแอคทีฟ

1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการสีรีแอคทีฟของระบบกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชัน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 สีรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา คือ สีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195

1.3.2 สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการศึกษา คือ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

1.3.3 ปัจจัยที่ศึกษาในการสร้างตะกอนสี

1.3.3.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

1.3.3.2 ปริมาณของสารสร้างตะกอนที่ 500, 1,000, 1,500, 2,000, 3,000, 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3.4 ในศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีของระบบกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชัน ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ขนาด 50 ลิตร

1.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีระหว่างระบบอัลตร้าฟิลเตรชันกับระบบกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชัน

1.3.6 ศึกษาปัจจัยของความดันในการเดินระบบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชัน

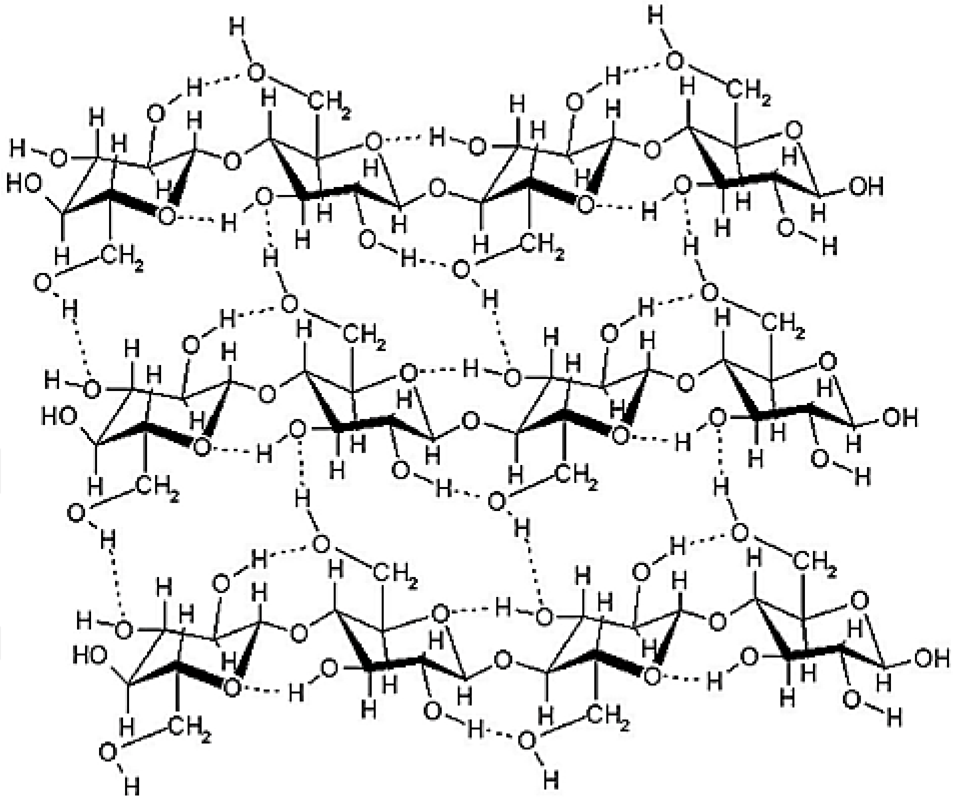
1.4.2 สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียสีสำหรับโรงงานขนาดเล็กที่มีต้นทุนต่ำ

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 2
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 เส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้าย เป็นเส้นใยสิ่งทอที่ได้จากธรรมชาติที่มีความสำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง มีสัดส่วนประมาณ 1 ใน 3 ของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ทำจากเส้นใยทั้งหมดทั่วโลก เส้นใยฝ้ายเจริญเติบโตอยู่บริเวณรอบผิวเมล็ดของต้นฝ้ายและมีเซลลูโลสซึ่งเป็นสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 90-95 ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นของหน่วยกลูโคส 1,4-β-D ที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะวาเลนซ์ระหว่างอะตอมของคาร์บอนหมายเลข 1 ของโมเลกุลกลูโคสหนึ่งโมเลกุลกับคาร์บอนหมายเลข 4 ของโมเลกุลกลูโคสอื่น และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ยื่นออกทางด้านข้างของโมเลกุลโซ่เชื่อมโยงโซ่ใกล้เคียงเข้าด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและสร้างไมโครไฟเบอร์แบบริบบิ้นซึ่งจะจัดเรียงกันเป็นเส้นใย (Grishanov, 2011)



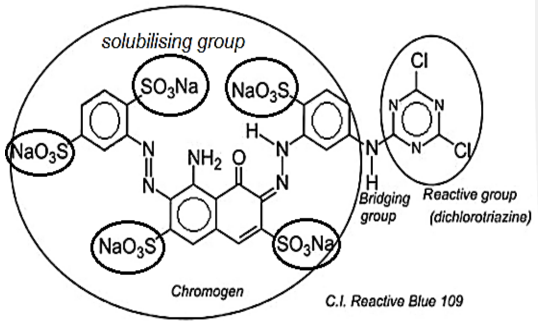
รูปภาพ 1 โครงสร้างของเซลลูโลสและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเซลลูโลส

ที่มา: (A. K. Dey & Dey, 2021)

2.2 สีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟ เป็นสีย้อมที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการย้อมสีและพิมพ์สีบนเส้นใยเซลลูโลสเป็นเวลายาวนาน สีรีแอคทีฟถูกนำมาใช้ครั้งแรกในแบรนด์สีย้อม Procion โดย ICI (Imperial Chemical Industries Limited) ในปี ค.ศ. 1956 สำหรับการย้อมสีที่ให้ความสดใสและรวดเร็วบนวัสดุเซลลูโลส (Chattopadhyay, 2011)

สีรีแอคทีฟ เป็นสีย้อมประจุลบที่ละลายน้ำได้ (Chattopadhyay, 2011) สีย้อมนี้สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับเส้นใยฝ้าย ทำให้สีย้อมกลายเป็นส่วนหนึ่งของเส้นใย เป็นผลให้มีความคงทนต่อการซักสูงกว่าสีย้อมที่ยึดติดบนเส้นใยโดยการดูดซับ (Swati, 2017) โครงสร้างของสีรีแอคทีฟประกอบด้วย 4 ส่วน (Chattopadhyay, 2011) แสดงดังรูปภาพ 2



รูปภาพ 2 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ โทนสีน้ำเงิน 109
ที่มา: ดัดแปลงจาก (Pal, 2017)

- โครโมเจน เป็น ส่วนที่ก่อให้เกิดสี
- หมู่รีแอคทีฟ เป็น หมู่ที่ใช้ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น
- สะพานเชื่อมต่อ เป็น ส่วนที่เชื่อมต่อหมู่รีแอคทีฟกับส่วนโครโมเจน
- หมู่การละลาย เป็น หมู่ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของสีย้อม

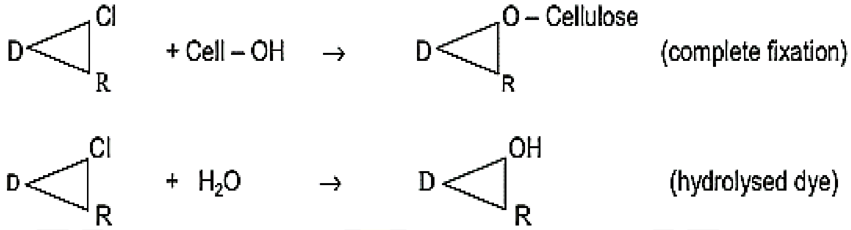
2.2.1 การจำแนกประเภทของสีรีแอคทีฟ

สามารถจำแนกโดยใช้การทำปฏิกิริยาของหมู่รีแอคทีฟกับวัสดุเส้นใยออกเป็น 2 กลุ่ม

2.2.1.1 หมู่รีแอคทีฟที่ใช้ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophilic substitution reaction)

หมู่รีแอคทีฟในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกคลอโรไตรอะซีน (Chlorotriazine) เช่น โมโนคลอโรไตรอะซีน (Monochlorotriazine) และ ไดคลอโรไตรอะซีน (Dichlorotriazine) โดย

คลอรีนของวงแหวนไตรอะซีนจะถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลส นอกจากนี้ คลอโรไตรอะซีนยังสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำได้เช่นเดียวกัน โดยปฏิกิริยาของสีย้อมกับน้ำเรียกว่าไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นผลให้สีย้อมที่ถูกไฮโดรไลซ์เสียความสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส (Chattopadhyay, 2011) แสดงดังรูปภาพ 3

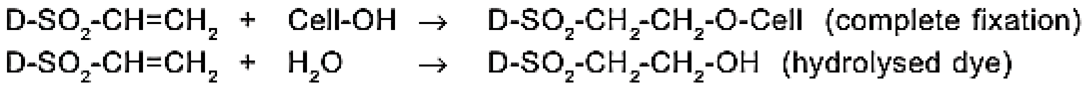


รูปภาพ 3 ปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอโรไตรอะซีนกับเซลลูโลสและน้ำ

ที่มา: (Chakraborty, 2014)

2.2.1.2 หมู่รีแอคทีฟที่ใช้ปฏิกิริยาการเติมนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophilic addition reaction)

หมู่รีแอคทีฟในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นไวนิลซัลโฟน (Vinyl sulphone) มีสูตรทั่วไปของสีย้อมเหล่านี้เป็น Dye-$SO_2CH=CH_2$ โดยปฏิกิริยาการเติมนิวคลีโอไฟล์จะเกิดที่ตำแหน่งพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน นอกจากนี้ ไวนิลซัลโฟนยังสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำได้เช่นเดียวกัน (Chattopadhyay, 2011; Swati, 2017) แสดงดังรูปภาพ 4



รูปภาพ 4 ปฏิกิริยาระหว่างไวนิลซัลโฟนกับเซลลูโลสและน้ำ

ที่มา: (Chakraborty, 2014)

2.2.2 หลักการพื้นฐานของการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ

หลักการพื้นฐานของการย้อมสีเส้นใยฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ มี 3 ขั้นตอน ดังนี้ (Chattopadhyay, 2011; Swati, 2017)

2.2.2.1 การดูดซึม (Exhaustion) ในขั้นตอนนี้ สีรีแอคทีฟจะถูกดูดซับโดยเส้นใยเซลลูโลส และมีการเติมเกลือเพื่อเพิ่มการดูดซับ

2.2.2.2 การตรึง (Fixation) ในขั้นตอนนี้ การตรึงสีรีแอคทีฟจะเกิดขึ้นในสภาวะด่าง เมื่อทำการเติมสารละลายด่าง สีรีแอคทีฟจะทำปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลสหรือโมเลกุลของน้ำ

2.2.2.3 การล้าง (Wash off) หลังจากขั้นตอนการตรึง สีรีแอคทีฟที่ไม่ได้ตรึงอยู่กับเส้นใยเซลลูโลสจะถูกล้างออกด้วยสบู่หรือผงซักฟอก

2.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีรีแอคทีฟ

2.2.3.1 เกลือ

สีรีแอคทีฟและเส้นใยเซลลูโลสมีประจุลบเหมือนกัน เมื่อทั้งสองอยู่ในอ่างย้อม ทำให้เกิดการผลักกัน เป็นผลให้ลดความสามารถในการดูดซึม การเติมเกลือเป็นการช่วยลดความต่างศักย์ระหว่างสีรีแอคทีฟและเส้นใยเซลลูโลส ทำให้การดูดซึมเกิดได้ดีขึ้น (Chakraborty, 2014)

2.2.3.2 อัลคาไลน์

อัลคาไลน์ หรือสารเพิ่มสภาพด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำให้เกิดการแยกตัวของไฮโดรเจนออกจากหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส เป็นผลให้ได้เส้นใยเซลลูโลสมีประจุลบ ($Cell–O^-$) ซึ่งพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับสีรีแอคทีฟ (Swati, 2017) โดยมีสมการปฏิกิริยาระหว่างเบสกับเซลลูโลส ดังนี้

$$\text{Cell-OH} + \text{HO}^- \rightarrow \text{Cell–O}^- + \text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

$$\text{Cell–O}^- + \text{Dye-Cl} \rightarrow \text{Cell-O-Dye} + \text{Cl}^- \quad (2)$$

2.2.4 ปัญหาของสีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำได้เช่นเดียวกับเซลลูโลส ส่งผลให้การตรึงสีรีแอคทีฟกับเส้นใยเซลลูโลสลดลง ปริมาณของสีรีแอคทีฟที่ไม่ถูกตรึงกับเส้นใยเซลลูโลสระหว่างการย้อมมีมากถึงร้อยละ 50 ซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีสูง นอกจากนี้ ปริมาณของสีรีแอคทีฟที่ไม่ถูกตรึงกับเส้นใยเซลลูโลสระหว่างการย้อมยังมากกว่าสีย้อมชนิดอื่น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละปริมาณของสีย้อมที่ไม่ถูกตรึงกับเส้นใยระหว่างกระบวนการย้อม

Fiber	Dye Type	% Unfixed Dye
Wool and Nylon	Acid Dyes	7-20
	Reactive Dyes for Wool	
	Pre-metallized Dyes	2-7
Cotton and Viscose	Azoic Dyes	5-10
	Reactive Dyes	20-50
	Direct Dyes	5-20
	Pigment	1
	Vat Dyes	5-20
	Sulfur Dyes	30-40
Polyester	Disperse Dyes	8-20
Acrylic	Modified Basic	2-3

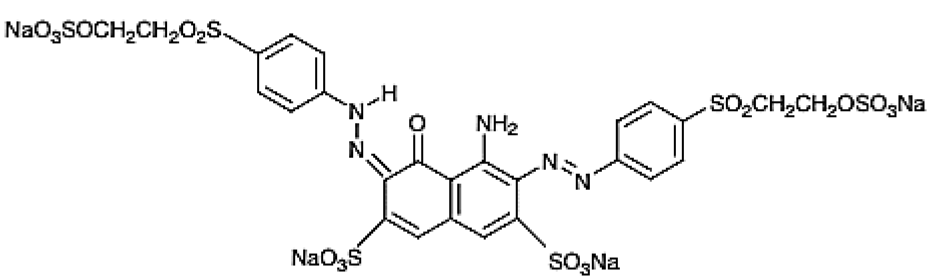
ที่มา: (Gita et al., 2017)

2.2.5 สีรีแอคทีฟที่มีหมู่รีแอคทีฟ 2 หมู่ (Bifunctional reactive dye)

สีรีแอคทีฟที่มีหมู่รีแอคทีฟ 2 หมู่ ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยากับเส้นใย ซึ่งช่วยเพิ่มการตรึงสีรีแอคทีฟกับเส้นใยมากขึ้นและลดการเกิดไฮโดรไลซิสกับน้ำ สีรีแอคทีฟที่มีหมู่รีแอคทีฟ 2 หมู่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สีรีแอคทีฟที่มีหมู่รีแอคทีฟเหมือนกัน (Homobifunctional) เช่น สีรีแอคทีฟ โทนสีดำ 5 (C I Reactive Black 5) และสีรีแอคทีฟที่มีหมู่รีแอคทีฟต่างกัน (Heterobifunctional) เช่น สีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195

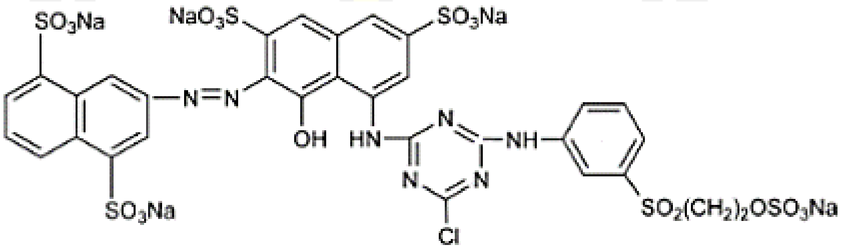
การตรึงสีรีแอคทีฟที่มีหมู่รีแอคทีฟ 2 หมู่ กับเส้นใยเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากมีโอกาสในการทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสเพิ่มขึ้นด้วยหมู่รีแอคทีฟหมู่ใดหมู่หนึ่ง นอกจากนี้ กลุ่มของโมโนคลอโรไตรอะซีนช่วยให้สีรีแอคทีฟถูกดูดซับโดยเส้นใยได้ดีขึ้น ในขณะที่กลุ่มของไวนิลซัลโฟนทำให้พันธะระหว่างสีรีแอคทีฟกับเส้นใยสีย้อมมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นต่อการย่อยสลายด้วยกรด

อุณหภูมิที่ใช้สำหรับสีย้อมเหล่านี้อยู่ในช่วง 50–80 ° C เนื่องจากความแตกต่างของปฏิกิริยาระหว่างหมู่รีแอคทีฟทั้งสองกลุ่ม โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างไวนิลซัลโฟนกับเส้นใยโดยที่อุณหภูมิต่ำและเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอโรไตรอะซีนที่อุณหภูมิที่สูง (Clark, 2011)



รูปภาพ 5 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ โทนสีดำ 5

ที่มา: (Lewis, 2011)



รูปภาพ 6 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195

ที่มา: (Perng & Bui, 2014)

2.3 น้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

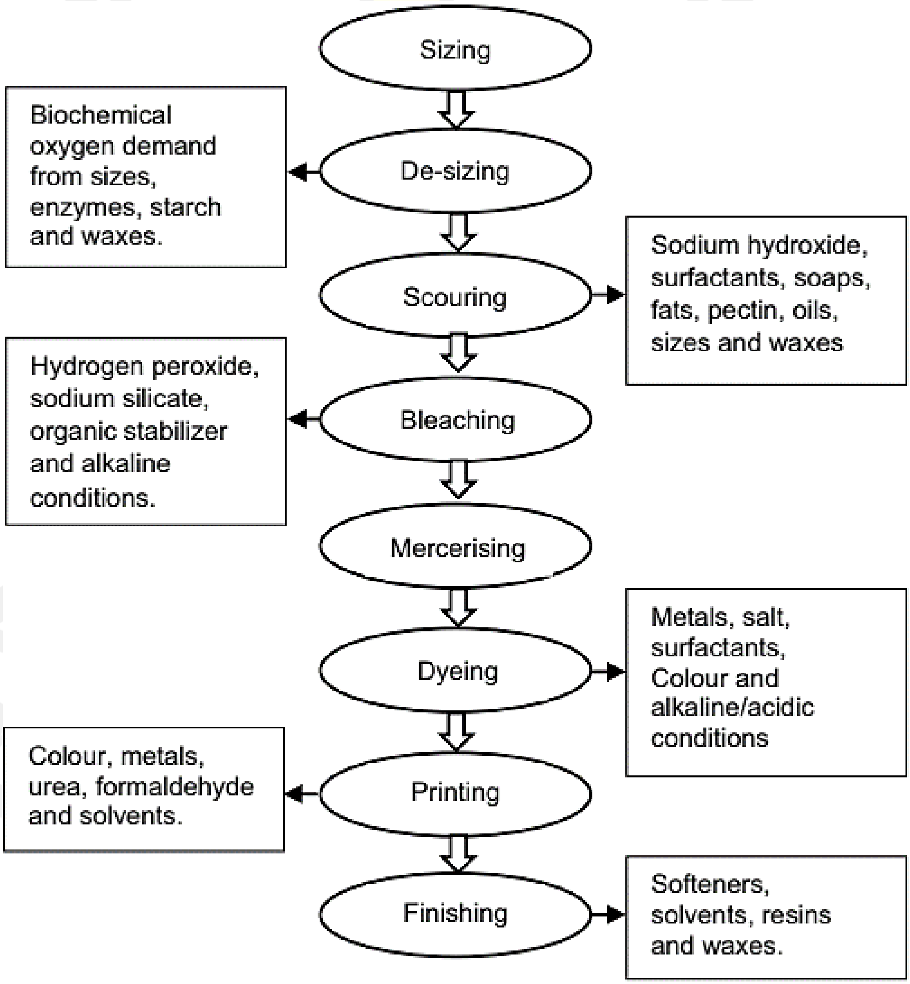
2.3.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำในปริมาณมาก เนื่องจากมีการใช้น้ำตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งมีการประเมินการใช้น้ำโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 50-100 ลิตรต่อการแปรรูปวัสดุสิ่งทอ 1 กิโลกรัม ในการแปรรูปสิ่งทอแบบเปียก (Wet process) น้ำถูกนำมาใช้ตั้งแต่กระบวนการลงแป้ง (Sizing), การลอกแป้ง (De-sizing), การขจัดสิ่งสกปรก (Sourcing), การฟอกขาว (Bleaching), การชุบมัน (Mercerizing), การย้อม (Dyeing), การพิมพ์ (Printing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) พร้อมกับสารเคมีที่เหมาะสม (Samanta et al., 2019) ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 2 และสารมลพิษที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการของการแปรรูปสิ่งทอแบบเปียก แสดงดังรูปภาพ 7

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม

Process	Consumption of Water (L/kg)
De-sizing	3
Washing	20
Scouring	2
Washing	20
Bleaching	2
Washing	40
Total	87

ที่มา: ดัดแปลงจาก (Samanta et al., 2019)



รูปภาพ 7 สารมลพิษที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนของการฟอกย้อม

ที่มา: (Yaseen & Scholz, 2019)

2.3.2 ลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีมีความเข้มข้นสี, พีเอช, ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งละลายทั้งหมด, ซีโอดี, บีโอดี, โลหะ, อุณหภูมิ และเกลือ อยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง **(Yaseen & Scholz, 2019)** ซึ่งลักษณะน้ำเสียในแต่ละกระบวนการการฟอกย้อม แสดงดังตารางที่ 3 และลักษณะน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2-4

ดังนั้น ในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นต้องลดพารามิเตอร์เหล่านี้ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 3 ลักษณะของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม

Process	Effluent Composition	Effluent Parameter
Sizing	Starch, waxes, Carboxymethyl Cellulose (CMC), Polyvinyl Alcohol (PVA), Wetting agents.	High in BOD, COD
De-sizing	Starch, CMC, PVA, fats, waxes, pectin	High in BOD, COD, SS, dissolved solids (DS)
Bleaching	Sodium Hypochlorite, Cl_2, NaOH, H_2O_2, acids, Surfactants, $NaSiO_3$, Sodium Phosphate, short cotton fiber	High alkalinity, high SS
Mercerizing	Sodium Hydroxide, cotton wax	High pH, low BOD, high DS
Dyeing	Dyestuffs Urea, reducing agents, oxidizing agents, Acetic acid, detergents, Wetting agents.	strongly colored, high BOD, DS, low SS, heavy metals
Printing	Pastes, urea, starches, gums, oils, binders, acids, Thickeners, cross-linkers, reducing agents, alkali	Highly colored, high BOD, Oily appearance, SS, slightly alkaline

ที่มา: ดัดแปลงจาก (S. Dey & Islam, 2012)

ตารางที่ 4 ลักษณะของน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย

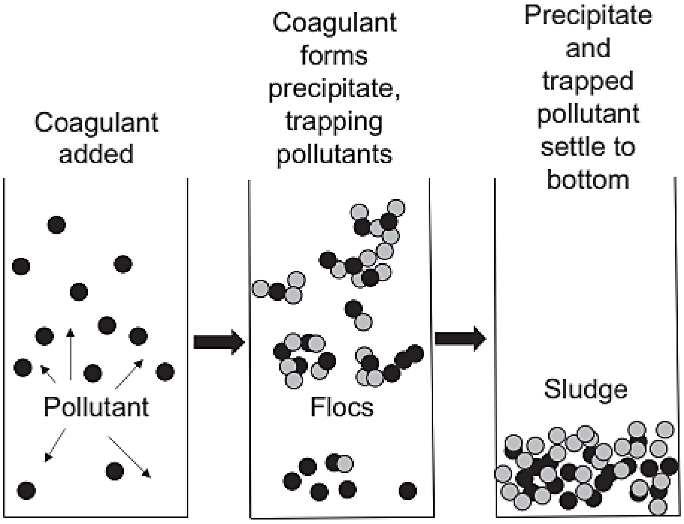
Effluent Parameter	Unit	Dyebath Wastewater	Raw Textile Wastewater	Effluent from Activated Sludge
COD	mg/L	45,500	2,600	750
BOD	mg/L	5	520	25
SS	mg/L	45	130	90
TDS	mg/L	45,000	5,600	4,800
Color	Pt-Co	2,502,000	2105	420

ที่มา: ดัดแปลงจาก (Nopkhuntod et al., 2012)

2.4 กระบวนการสร้างตะกอน

กระบวนการสร้างตะกอน เป็นกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยทั่วไป กระบวนการสร้างตะกอนเป็นการเติมสารเคมี เพื่อปรับเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของของแข็งแขวนลอยที่ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ละลายอยู่ในน้ำได้ง่ายขึ้นด้วยกระบวนการตกตะกอนในภายหลัง ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ใช้งานง่าย, การออกแบบระบบที่ค่อนข้างเรียบง่าย, และใช้พลังงานต่ำ (Teh et al., 2016)

กระบวนการสร้างตะกอน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย การสร้างตะกอน (Coagulation), การรวมตะกอน (Flocculation) และการตกตะกอน (Sedimentation) โดยขั้นตอนแรก การสร้างตะกอน เป็นกระบวนการทางเคมี เพื่อทำให้ประจุของสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์เกิดความไม่เสถียร โดยการเติมสารสร้างตะกอน (Coagulant) ทำให้ประจุเป็นกลาง, ขั้นตอนที่สอง การรวมตะกอน เป็นกระบวนการทางกายภาพ เพื่อทำให้อนุภาคขนาดเล็กของสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์รวมกันเป็นกลุ่มหรือฟล็อค (Floc) สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ง่าย และขั้นตอนสุดท้าย การตกตะกอน เป็นกระบวนการทางกายภาพ โดยใช้แรงโน้มถ่วงในการแยกตะกอนหนักออกจากน้ำ (Collivignarelli et al., 2019) แสดงดังรูปภาพ 8



รูปภาพ 8 ภาพประกอบของกระบวนการสร้างตะกอนในการกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในรูปของคอลลอยด์

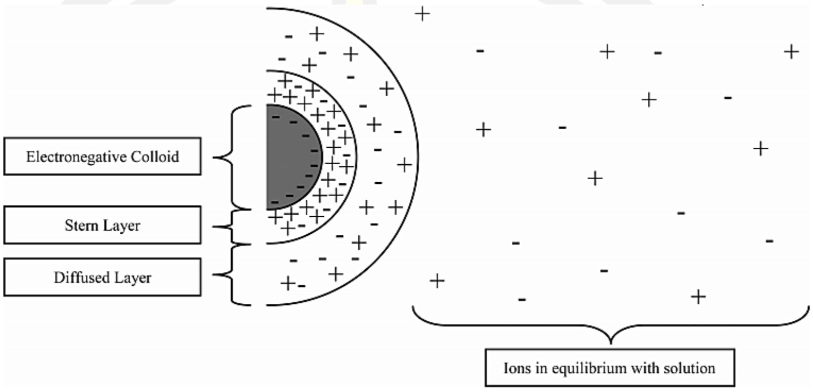
ที่มา: (Barrera-Díaz et al., 2018)

2.4.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์

เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นอยู่ในน้ำ มาจากอิทธิพลของประจุไฟฟ้า (Electrokinetic charge) จากอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคของคอลลอยด์อาจมีประจุไฟฟ้าหลักเป็นลบหรือบวกได้ ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่ที่อยู่ในน้ำมีประจุไฟฟ้าหลักเป็นลบ การที่อนุภาคคอลลอยด์ยังคงกระจายตัวอยู่ในน้ำและไม่เกิดการรวมตัว เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 1 ไมโครเมตร (μm) ทำให้มีแรงดึงดูด (Attractive force) ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์มีค่าน้อยกว่าแรงผลัก (Repulsive force) ของประจุไฟฟ้าระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ และแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าหลักเหมือนกัน (Shammas, 2005; Teh et al., 2016)

พฤติกรรมของคอลลอยด์ในน้ำ สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีประจุไฟฟ้า 2 ชั้น (Electric double layer theory) โดยประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์จะดึงดูดประจุไฟฟ้าตรงข้าม หรือเรียกว่า เคาน์เตอร์ไอออน (Counter Ion) ซึ่งเคาน์เตอร์ไอออนเหล่านี้จะถูกดึงดูดเข้าหาประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) เคาน์เตอร์ไอออนจะก่อตัวเป็นชั้นรอบๆประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์ โดยชั้นของเคาน์เตอร์ไอออนที่ติดอยู่กับประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์ ถูกเรียกว่า ชั้นสเติร์น (Stern Layer) จากนั้น ประจุไฟฟ้าในชั้นสเติร์นจะดึงดูดเคาน์เตอร์ไอออนของตัวเองและจะก่อตัวเป็นชั้นของเคาน์เตอร์ไอออนรอบๆชั้นสเติร์น เรียกว่า ชั้นกระจาย (Diffuse layer) แสดงดังรูปภาพ 9

นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในชั้นกระจายมีความแตกต่างจากประจุไฟฟ้าในชั้นสเติร์น โดยประจุไฟฟ้าบางส่วนของชั้นกระจายจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์โดยการเฉือนไปตามระนาบเฉือน (Shear plane) ซึ่งเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเฉือนเรียกว่า ศักย์ซีต้า (Zeta potential) สำหรับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำมักจะได้ศักย์ซีต้าระหว่าง –5 ถึง –40 มิลลิโวลต์ (mV) (Teh et al., 2016)



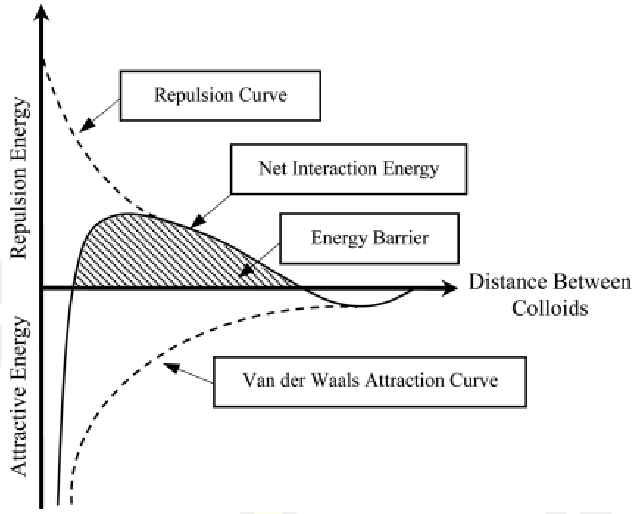
รูปภาพ 9 ประจุไฟฟ้า 2 ชั้น ของอนุภาคคอลลอยด์

ที่มา: (Teh et al., 2016)

2.4.2 เสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎี DLVO โดยทฤษฎีนี้เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์และแรงผลักที่เกิดจากการทับซ้อนกันของประจุไฟฟ้า 2 ชั้นระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แสดงดังรูปภาพ 10

เมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้าหากัน จะเกิดการทับซ้อนกันของประจุไฟฟ้า 2 ชั้น ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้มีแรงผลักเกิดขึ้นและเกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ โดยที่แรงผลักจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกัน ซึ่งทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและไม่สามารถชนกันได้หากมีแรงดึงดูดน้อยกว่าแรงผลักที่เกิดขึ้น จากรูปภาพ 10 หากอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกันมากๆ ส่งผลให้มีแรงดึงดูดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าแรงผลัก ซึ่งทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและจะรวมตัวกัน (Shammas, 2005)



รูปภาพ 10 พลังงานดึงดูดและพลังงานผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ตามระยะทาง

ที่มา: (Teh et al., 2016)

2.4.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอย์ สามารถถูกทำลายได้ด้วยกลไล 4 แบบ

2.4.2.1 การบีบอัดประจุไฟฟ้า 2 ชั้น (Double layer compression)

กลไกนี้เป็นการลดขนาดประจุไฟฟ้า 2 ชั้นรอบๆอนุภาคคอลลอยด์ โดยการใช้เคาน์เตอร์ไอออนกับประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้ชั้นกระจายบางลงและอนุภาคคอลลอยด์สามารถเข้าใกล้กันก่อนที่จะเกิดแรงผลัก เคาน์เตอร์ไอออนสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เช่น Al^{3+}, Mg^{2+} และ Na^{+} เคาน์เตอร์ไอออนสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก เช่น PO_4^{3-}, SO_4^{2-} และ Cl^{-} (Shammas, 2005; Teh et al., 2016)

2.4.2.2 การทำให้ประจุไฟฟ้าเป็นกลาง (Charge neutralization)

กลไกนี้เป็นการทำให้ประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง โดยการดูดซับเคาน์เตอร์ไอออนบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งพบว่าเคาน์เตอร์ไอออนจากการเกิดไฮโดรไลซิสของสารสร้างตะกอน เช่น $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Fe_2(OH)_2^{4+}$ และ $Fe_3(OH)_4^{5+}$ มีประสิทธิภาพในการทำให้ประจุไฟฟ้าลบของอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง แต่อย่างไรก็ตาม หากใช้สารสร้างตะกอนมากเกินไป ประจุไฟฟ้าหลักของอนุภาคคอลลอยด์จะเปลี่ยนจากลบเป็นบวกและฟื้นฟูกลับคืนมา (Shammas, 2005; Teh et al., 2016)

2.4.2.3 การห่อหุ้มคอลลอย์ (Colloid entrapment)

กลไกนี้เป็นการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอย์ด้วยตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อเติมสารสร้างตะกอนในความเข้มข้นสูงมากพอ เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ สารสร้างตะกอน จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอก

ไซด์ (Al(OH)$_3$) หรือ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)$_3$) โดยอนุภาคคอลลอยด์จะเข้าไปติดอยู่ในตะกอน ไม่ว่าในระหว่างการก่อตัวของตะกอนหรือหลังจากนั้น ซึ่งการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ ถูกเรียกอีกอย่างว่า “กลไกแบบกวาด” (Sweep coagulation) (Shammas, 2005)

2.4.2.4 การเชื่อมระหว่างอนุภาค (Intraparticle bridging)

กลไกนี้เป็นการเชื่อมระหว่างอนุภาคโดยการใช้โพลีเมอร์ โดยสายโซ่พอลิเมอร์จะดูดติดบนพื้นผิวอนุภาคคอลลอยด์ด้วยพันธะเคมีหรือการยึดติดทางกายภาพ เมื่อสายโซ่บางส่วนของโพลีเมอร์ยึดติดกับอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนที่เหลือของสายโซ่พอลิเมอร์จะยื่นออกไปในน้ำเพื่อยึดจับอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ อนุภาคคอลลอยด์จะผูกติดกันด้วยสายโซ่พอลิเมอร์จะพันกับสายโซ่พอลิเมอร์อื่นๆเกิดเป็นฟล็อค (Shammas, 2005; Teh et al., 2016)

2.4.3 สารสร้างตะกอน

สารสร้างตะกอน เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในน้ำเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอน โดยทั่วไปสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารสร้างตะกอนที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) , อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และโซเดียมอลูมิเนต ($NaAlO_2$) เป็นต้น และสารสร้างตะกอนที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$), เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นต้น

2.4.3.1 อะลูมิเนียมซัลเฟต

อะลูมิเนียมซัลเฟต มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า “สารส้ม” ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากมีประสิทธิภาพ, มีต้นทุนต่ำ และพร้อมใช้งานได้ทันที สารส้มมีให้เลือกใช้ทั้งแบบสารละลายและแบบผงหรือเม็ด สารส้มแบบผงหรือเม็ดมีสูตรทางเคมีคือ ($Al_2(SO_4)_3.14H_2O$) และมีสีขาวงาช้าง เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 3

$$Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4 \quad (3)$$

หากมีสภาพความเป็นด่างไม่เพียงพอ สารส้มจะไม่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น เมื่อสภาพความเป็นด่างตามธรรมชาติไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับปริมาณสารส้มสามารถเติมแคลเซียมไบคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อชดเชยส่วนที่ขาดดุลได้ (Pal, 2017; Shammas, 2005) แสดงดังสมการที่ 4 และ 5

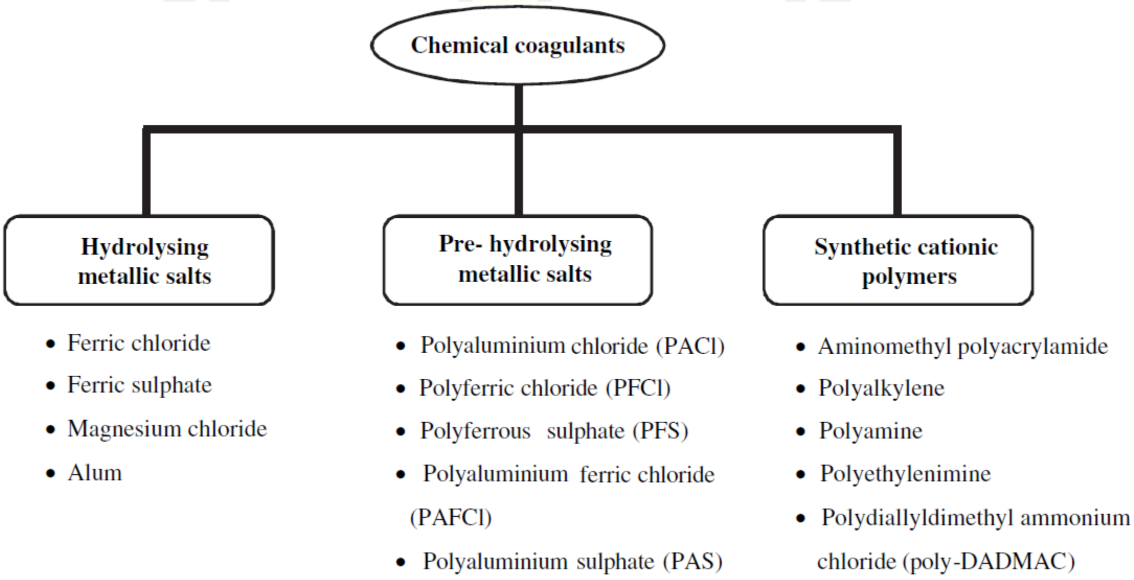
$$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 6CO_2 \quad (4)$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 3NaCO_3 + 3H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3NaSO_4 + 3CO_2 \quad (5)$$

แคลเซียมไบคาร์บอเนตเป็นสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำแต่มีข้อเสียคือทำให้น้ำมีความกระด้าง ดังนั้น จึงควรใช้โซเดียมคาร์บอเนตแทนแคลเซียมไบคาร์บอเนต เพื่อลดความกระด้างของน้ำ และสารส้มมีพีเอชที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนอยู่ที่พีเอช 6 โดยมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการทำงานอยู่ระหว่าง 5 ถึง 8 (Shammas, 2005)

2.4.3.2 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอนที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสร้างตะกอนก่อนไฮโดรไลซ์ (Pre-hydrolyzed coagulant) และมีข้อดีที่เหนือกว่าสารสร้างตะกอนที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสร้างตะกอนไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed coagulant) ได้แก่ มีประสิทธิภาพดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ, มีปริมาณของอะลูมิเนียมเหลือตกค้างน้อยกว่า, มีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นน้อยกว่า, มีผลต่อค่าพีเอชของน้ำดิบน้อยกว่า และใช้เวลาในการตกตะกอนน้อยกว่า (Wei et al., 2015)



รูปภาพ 11 การแบ่งประเภทของสารสร้างตะกอน

ที่มา: (Verma et al., 2012)

2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอน

2.4.4.1 ค่าพีเอชเริ่มต้น

ค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอน เนื่องจากสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน นอกจากนี้ ช่วงของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการสร้างตะกอนยังถูกกำหนดโดยชนิดของน้ำเสียและสารสร้างตะกอนที่ใช้ หากค่าพีเอชอยู่นอกช่วงของค่าพีเอชที่เหมาะสม จะส่งผลให้กระบวนการสร้างตะกอนมีประสิทธิภาพลดลง (Teh et al., 2016)

2.4.4.2 ปริมาณของสารสร้างตะกอน

ปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม เป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน การใช้สารสร้างตะกอน (Coagulant) หรือสารรวมตะกอน (Flocculant) ในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนลดลง นอกจากนี้ การใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่มากเกินไป สามารถรบกวนกระบวนการตกตะกอน ซึ่งจะทำให้ตะกอนกลับมาแขวนลอยตามเดิม (Teh et al., 2016)

2.4.4.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน

ความแข็งแรงและความเร็วในการตกตะกอนของฟล็อคที่เกิดขึ้น มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนโดยรวม ซึ่งความเร็วในการตกตะกอนของฟล็อคขึ้นอยู่กับขนาดของฟล็อคที่เกิดขึ้น หากเกิดฟล็อคที่มีขนาดเล็ก จะทำให้ตะกอนมีความเปราะบางและตกตะกอนได้ช้า ส่งผลให้เกิดความยากลำบากในการแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย (Teh et al., 2016)

2.4.4.4 พารามิเตอร์ของการกวน

การกวนเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่นสูง จะช่วยเพิ่มอัตราการดูดซับและการก่อตัวของฟล็อค เนื่องจากช่วยเพิ่มโอกาสของอัตราการชนกันของอนุภาค โดยทั่วไป การกวนแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ กวนเร็วและกวนช้า โดยจุดประสงค์ของการกวนเร็ว เพื่อให้แน่ใจว่ามีการกระจายตัวของสารสร้างตะกอนอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ เวลาที่ใช้ในการกวนยังมีผลต่อขนาดและความแข็งแรงของฟล็อคที่เกิดขึ้น การกวนเร็วที่ใช้เวลาค่อนข้างน้อย จะทำให้ได้ฟล็อคที่มีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ยกเว้น ฟล็อคมีความต้านทานต่อแรงเฉือนต่ำ (shear resistant) จะทำให้มีฟล็อคมีขนาดเล็กลง ในขณะที่กวนเร็วและใช้เวลามากขึ้น จะทำให้ได้ฟล็อคที่มีความแข็งแรง แต่มีขนาดเล็กเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม สามารถเพิ่มขนาดของฟล็อคที่เกิดขึ้นได้ โดยการกวนช้าและและใช้เวลาในกวนระยะหนึ่ง (Teh et al., 2016)

2.4.4.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพของการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน เนื่องจากมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และอัตราการชนกันของอนุภาค โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและความหนืดของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิต่างกัน นอกจากนี้ อุณหภูมิยังมีผลต่อประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอน เนื่องจากสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ เช่น สารส้มจะมีประสิทธิภาพลดลงที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการไฮโดรไลซิสและจลนศาสตร์การตกตะกอนลดลง เมื่อเทียบกับสารสร้างตะกอนที่ไฮโดรไลซ์พร้อมใช้งาน เช่น โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Teh et al., 2016)

2.5 ระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน

ระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น แป้ง, โปรตีน, เอนไซม์ ออกจากสารโมเลกุลขนาดเล็กอื่นๆ และน้ำ หรือเป็นกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เช่น น้ำนม, น้ำผลไม้, เอนไซม์ และสารปฏิชีวนะ เป็นต้น โดยอาศัยความดันเป็นแรงขับ (Pressure driven) ในการป้อนสารละลายผ่านเยื่อกรอง ซึ่งสารละลายที่ถูกกักด้วยเยื่อกรอง เรียกว่า รีเทนเทท (Retentate) หรือ สารละลายเข้มข้น (Concentrate) และน้ำหรือของเหลวที่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า เพอมิเอท (Permeate) ระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน มีขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร และใช้ความดันในการเดินระบบอยู่ระหว่าง 5-10 บาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองชนิดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 6

ในการบำบัดน้ำเสีย ระบบอัลตร้าฟิวเตรชันสามารถกำจัดโมเลกุลและอนุภาคขนาดใหญ่ได้ แต่ สามารถกำจัดสีได้เพียงร้อยละ 31-76 (Allègre et al., 2006) Aouni และคณะ (2012) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟระหว่างเยื่อกรองแบบอัลตร้าฟิลเตรชันกับเยื่อกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน พบว่า เยื่อกรองแบบอัลตร้าฟิลเตรชันสามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้น้อยกว่าร้อยละ 80 ในขณะที่เยื่อกรองแบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้มากกว่าร้อยละ 90

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบอัลตร้าฟิวเตรชันกับระบบออสโมซิสย้อนกลับและระบบนาโนฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียสี

ตารางที่ 5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแต่ละชนิด

Processes	Advantages	Disadvantages
Reverse Osmosis	Removal of all mineral salts, hydrolyzes reactive dyes and chemical auxiliaries	High pressure
Nanofiltration	Separation of organic compounds of low molecular weight and divalent ions from monovalent salts Treatment of high concentrations	/
Ultrafiltration/ Microfiltration	Low pressure	Insufficient quality of the treated wastewater

ที่มา: ดัดแปลงจาก (Allègre et al., 2006)

ตารางที่ 6 การจำแนกชนิดของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรอง

Membrane Process	Pore Size	Separation Mechanism	Membrane	Driving Force	Operating Pressure (bar)
Microfiltration	0.2-10 μm or >50 nm	Sieving	Porous	Hydrostatic pressure	2-5
Ultrafiltration	2-50 nm	Sieving	Porous	Hydrostatic pressure	5-10
Nanofiltration	< 2 nm	Sieving + Donnan Exclusion	Partly Porous, Partly Dense	Hydrostatic pressure	10-20
Reverse Osmosis	< 5 Å	Solution Diffusion	Dense	Hydrostatic pressure	20-50
Forward Osmosis	< 5 Å	Solution Diffusion	Dense	Pressure Gradient	1-2
Pervaporation	< 5 Å	Solution Diffusion	Dense	Vapor Pressure Gradient	-
Gas Separation	< 5 Å	Knudsen Diffusion, Solution Diffusion	Porous	Pressure Gradient	15-130
Electrodialysis	< 5 Å	Electromigr ation	Dense with Electrical Charge	Electrical Potential	-
Dialysis	< 5 Å	Diffusion	Dense	Concentrati on Gradient	-

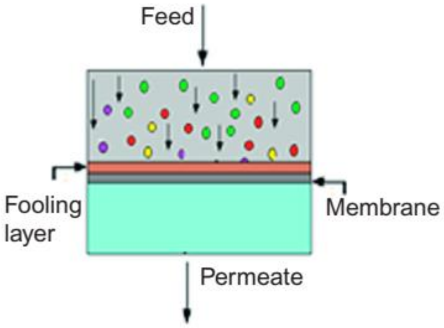
ที่มา: ดัดแปลงจาก (Pal, 2017)

2.5.1 แบบจำลองของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรอง

แบบจำลองของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรอง สามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.5.1.1 กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบปิดตาย (Dead end filtration)

กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบปิดตาย เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางตั้งฉากกับเยื่อกรอง ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวหน้าของเยื่อกรอง เรียกว่า “เค้ก” (Cake) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ (Flux) ลดลงและค่าความต้านทานของการแยกด้วยเยื่อกรองเพิ่มขึ้น การแยกด้วยเยื่อกรองแบบนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นไม่มากนัก หรือเหมาะสำหรับการแยกสารละลายปริมาณน้อยเพื่อการวิเคราะห์

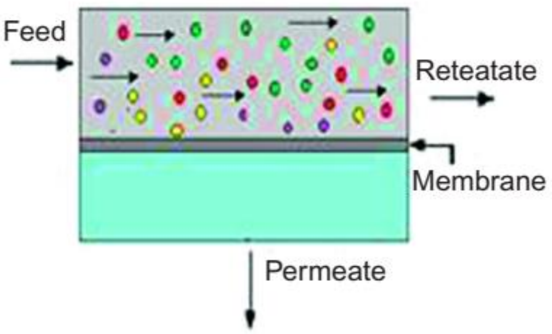


รูปภาพ 12 ลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบปิดตาย

ที่มา: (Pal, 2017)

2.5.1.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบไหลตามขวาง (Cross flow filtration)

กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบไหลตามขวาง เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางขนานกับเยื่อกรอง หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมิเอท ซึ่งจะช่วยลดการสะสมของอนุภาคบนผิวหน้าของเยื่อกรอง กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบไหลตามขวางเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถลดความเข้มข้นสะสม (Concentration polarization) และการเกิดเค้กบนผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งเหมาะสำหรับการแยกสารละลายปริมาณมาก



รูปภาพ 13 กระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองแบบไหลตามขวาง

ที่มา: (Pal, 2017)

2.5.2 ค่าฟลักซ์และค่าการกักกัน

ในระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน ค่าฟลักซ์และค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงถึงสมรรถนะของระบบ สมการของฟลักซ์ เขียนในรูปของแรงขับดันและความต้านทานต่อการไหล ดังนี้ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

$$J_V = \frac{(\Delta P - \Delta \pi)}{\mu_V R_t} \quad (6)$$

เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของสารละลายผ่านเยื่อกรอง ($m^3/m^2.s$)

ΔP = ผลต่างความดันที่ให้กับสารละลาย (Pa)

$\Delta \pi$ = ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (PA)

μ_v = ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)

R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน (m^{-1})

สำหรับสารละลายของสารของสารโมเลกุลใหญ่ ค่า $\Delta \pi << \Delta P$ จึงอาจตัดเทอม $\Delta \pi$ ทิ้ง ดังนั้น สมการลดรูป ดังนี้

$$J_V = \frac{\Delta P}{\mu_V R_t} \quad (7)$$

สำหรับค่าการกักกันปรากฏ (R) คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ โดย ค่า R มีสมการ ดังนี้ดังนี้

$$R = \left(1 - \frac{C_P}{C_R}\right) \times 100 \quad (8)$$

โดย C_P และ C_R เป็นความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอมิเอทและรีเทนเทท ตามลำดับ ค่า R จากสมการ (8) เป็นค่าปรากฏ เนื่องจากการเกิด Concentration Polarization (CP) ทำให้ตัวถูกละลายโมเลกุลใหญ่สะสมอยู่ที่ผิวของเยื่อกรอง ส่งผลให้ความเข้มข้นที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง (C_W) มีค่าสูงกว่า C_R และค่าการกักกันจริง (R_{int}) สูงกว่าค่า R หรือ $R_{int} > R$ โดย ค่า R_{int} มีสมการ ดังนี้

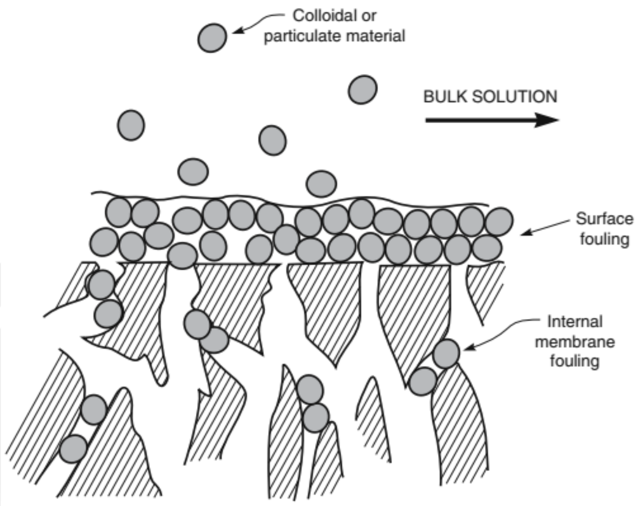
$$R_{int} = \left(1 - \frac{C_P}{C_W}\right) \times 100 \qquad (9)$$

2.5.3 Concentration Polarization (CP)

การเกิด CP ในระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลาย (Solvent) ถูกพาสู่เยื่อกรอง ตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่และไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ จะถูกกักและสะสมอยู่ที่ผิวของเยื่อกรอง ซึ่งนำไปสู่การเกิดฟาวลิง ซึ่งทำให้สมรรถนะของเยื่อกรองลดลง การเกิด CP ของระบบอัลตร้าฟิวเตรชันมีผลต่อเยื่อกรองในลักษณะที่ซับซ้อนและควบคุมได้ยากกว่าระบบออสโมซิสผันกลับ เนื่องจากระบบออสโมซิสผันกลับมีการบำบัดสารป้อนและเลือกสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม ทำให้การเกิด CP จะไม่นำไปสู่การเกิดตะกรันที่ผิวเยื่อกรอง ในขณะที่ระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน สารละลายมีองค์ประกอบหลายชนิด ทำให้การเกิด CP นำไปสู่การเกิดฟาวลิง ซึ่งควบคุมได้ยากและส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

2.5.4 ฟาวลิง (Fouling)

การเกิด CP นำไปสู่การเกิดฟาวลิง ซึ่งการเกิดฟาวลิงเป็นสาเหตุที่ทำให้ฟลักซ์ลดลงในช่วงเวลายาวนาน โดยฟาวลิงจะเกิดจากการที่ตัวถูกละลายถูกกักหรือการดูดซับบนผิวหน้าเยื่อกรองและภายในรูพรุน แสดงดังรูปภาพ 14 ซึ่งหากเกิดฟาวลิงจะไม่สามารถใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของระบบ เช่น ปรับเปลี่ยนความดันและเพิ่มอัตราการไหล หรือการล้างด้วยน้ำ ในการกำจัดชั้นฟาวลิงออกจากเยื่อกรอง ในการกำจัดชั้นฟาวลิงออกจากเยื่อกรอง จำเป็นต้องใช้สารทำความสะอาด เพื่อทำให้ฟลักซ์ที่ลดลงกลับมาเพิ่มขึ้นตามเดิม (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)



รูปภาพ 14 ลักษณะการเกิดฟาวลิงบนเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน
ที่มา: (Baker, 2012)

2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

2.5.5.1 ความดัน การเพิ่มความดัน ทำให้ตัวถูกละลายมาอัดตัวกันแน่นที่ผิวของเยื่อกรอง ส่งผลให้เกิด CP หรือฟาวลิง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ฟลักซ์ลดลง

2.5.5.2 อัตราการไหล การเพิ่มอัตราการไหล ทำให้การเกิด CP และฟาวลิงลดลง ส่งผลให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น

2.5.5.3 อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น

2.5.5.4 ความเข้มข้น ค่าฟลักซ์แปรผกผันกับความเข้มข้น เพราะในระบบที่ความเข้มข้นสูง โอกาสที่จะเกิด CP และฟาวลิง สูงกว่าระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ

2.5.5.5 ค่าพีเอช ค่าพีเอชมีผลต่อฟลักซ์และการกักกันของเยื่อกรอง โดยเฉพาะตัวถูกละลายที่เป็นโปรตีน เนื่องจากโปรตีนสามารถแสดงประจุบวก ($-NH_3^+$) หรือประจุลบ (-COOH) ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย และที่จุด iep (isoelectric point) โมเลกุลของโปรตีนจะมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ ทำให้โปรตีนละลายได้น้อยและเกิดการจับกัน ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงที่ค่าพีเอชเข้าใกล้หรือเท่ากับ iep และการดูดซับของโปรตีนบนผิวเยื่อกรองหรือการเกิดฟาวลิงมีค่าสูง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 อิทธิพลของพีเอชต่อการไฮโดรไลซิสของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

Li และคณะ (2018) รายงานว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมประจุบวก เช่น Al^{3+} และ $Al(OH)^{2+}$ ที่พีเอชต่ำกว่า 5 ซึ่งอะลูมิเนียมประจุบวกเหล่านี้ มีความสามารถในการทำประจุไฟฟ้าให้เป็นกลาง (Charge neutralization ability) ขณะที่พีเอชระหว่าง 6 ถึง 8 โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมในรูปแบบของโพลิเมอร์ หรือ $Al(OH)_3$ ซึ่งอะลูมิเนียมเหล่านี้ มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสามารถดูดซับและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ และที่พีเอชมากกว่า 8 โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกเปลี่ยนเป็น $Al(OH)_4^-$ จากการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์

2.6.2 การกำจัดสีรีแอคทีฟด้วยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

Wong และคณะ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟและสีดิสเพิร์ส (Disperse dyes) โดยการใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม, โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่า ในการกำจัดสีรีแอคทีฟ สารส้มสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 78 โดยใช้ความเข้มข้น 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ช่วงพีเอชเหมาะสมอยู่ระหว่าง 3.9-4.1, แมกนีเซียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 99.2 โดยใช้ความเข้มข้น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ช่วงพีเอชเหมาะสมอยู่ระหว่าง 10.8-10.9 และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 99.9 โดยใช้ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงพีเอชเหมาะสมอยู่ระหว่าง 4.3-4.7 แสดงให้เห็นว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟมากกว่าสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ และใช้ปริมาณของสารสร้างตะกอนน้อยกว่าสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ

Perng และ Bui (2014) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟ ได้แก่ โทนสีน้ำเงิน 19, โทนสีดำ 5 และโทนสีแดง 195 โดยการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ได้มากกว่าร้อยละ 94 แสดงให้เห็นว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ

Rawi และคณะ (2016) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยการใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม, โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่า สารส้มสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 90 โดยใช้ความเข้มข้น 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2.4, แมกนีเซียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 99 โดยใช้ความเข้มข้น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 10.4 และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.1 แสดงให้เห็นว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟมากกว่าสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ และใช้ปริมาณของสารสร้างตะกอนน้อยกว่าสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ

2.6.3 การกำจัดสีรีแอคทีฟด้วยกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน

Berradi และ el Harfi (2017) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟและสีดิสเพิร์สโดยการใช้กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน พบว่า ที่พีเอชเหมาะสม (พีเอชเท่ากับ 12) กระบวนการสร้างตะกอนสามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้ร้อยละ 86.49 และสามารถกำจัดสีดิสเพิร์สได้ร้อยละ 89.69 ในขณะที่กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิวเตรชันสามารถกำจัดสีรีแอคทีฟได้ร้อยละ 97.43 และสามารถกำจัดสีดิสเพิร์สได้อย่างสมบูรณ์ แสดงให้เห็นว่า การใช้กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิวเตรชัน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟและสีดิสเพิร์สเพิ่มขึ้น

2.6.4 ฟาวลิง

Liang และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียสีจากอุตสาหกรรม โดยการใช้ระบบนาโนฟิวเตรชันที่เยื่อกรองมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและเป็นแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) พบว่า ค่าฟลักซ์ลดลงจาก 5 ถึง 4 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และค่าฟลักซ์เริ่มคงที่หลังจาก 100 ชั่วโมง ซึ่งการเกิดฟาวลิงเป็นไปอย่างช้าๆ Liang และคณะ ให้เหตุผลของปรากฏการณ์การเกิดฟาวลิงอย่างช้าๆ ดังนี้ (1) พื้นผิวของเยื่อกรองไม่ได้มีแต่ประจุบวกเท่านั้น แต่ยังมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงทำให้ตะกรันหรือตะกอนสะสมที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ยึดเกาะบนพื้นผิวของเยื่อกรองได้ยาก (2) การไหลของน้ำเสียอย่างรวดเร็วไปตามคาร์ทริดจ์ (Cartridge) ของเยื่อกรองแบบเส้นใยกลวง ทำให้เกิดแรงเฉือนสูง ซึ่งจะลดการก่อตัวของเค้กและฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) บนพื้นผิวของเยื่อกรอง (3) สีและสารให้สีมีความสามารถในการยึดติดเยื่อกรองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากน้ำเสียมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 (Reactive Red 195, KCB Textile Company)

3.1.2 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium Chloride, 30% Al_2O_3, World Chemical Company)

3.1.3 กรดซัลฟิวริก (1M H_2SO_4, QRec)

3.1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH pellet, QRec)

3.1.5 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐาน ได้แก่ บีกเกอร์ ขวดปรับปริมาตร กระบอกตวง ปิเปต เป็นต้น

3.2.2 เครื่องชั่งละเอียด

3.2.3 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-1900, Shimadzu)

3.2.4 เครื่องวัดค่าพีเอช (HQ40D Portable Multi Meter, Hach)

3.2.5 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำ (Cyber ScanCon 110, EUTECH)

3.2.6 ชุดทดลองการสร้างตะกอน (Jar Test)

3.2.7 ถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ขนาด 50 ลิตร

3.2.8 ชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

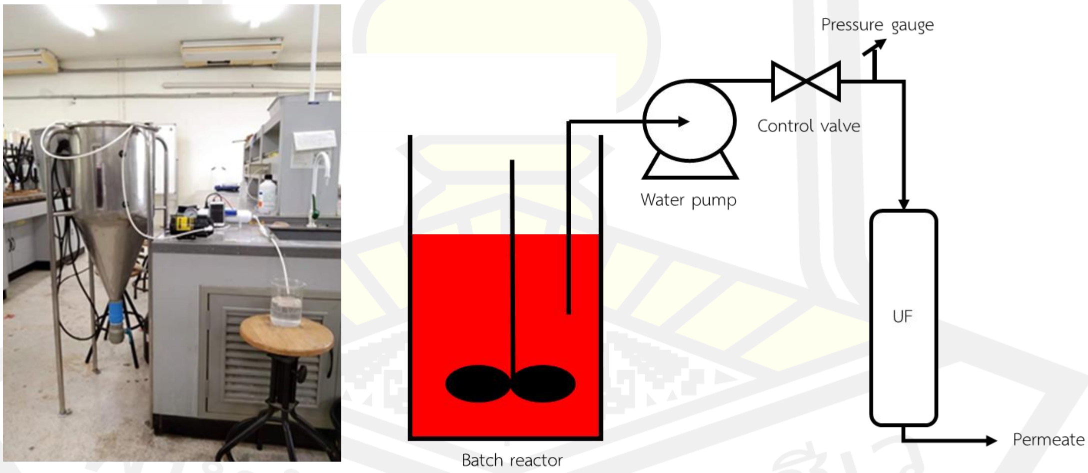
3.3 การเตรียมน้ำสีรีแอคทีฟที่ใช้ในการทดลอง

กำหนดความเข้มข้นของน้ำสีอยู่ที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการทดลอง โดยการละลายผงสีรีแอคทีฟ 1 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร จากนั้นกวนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ผงสีละลายหมด

3.4 การติดตั้งชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ประกอบด้วย ปั้มน้ำ 1 ตัว, วาล์วปรับแรงดันน้ำ 2 ตัว, มาตรวัดความดัน 1 ตัว และเยื่อกรองอัลตร้าฟิลเตรชัน (Ultrafiltration membrane model UF-10Q, HIDROTEK) แสดงดังรูปภาพ 3-1 และการติดตั้งชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชันกับถังปฏิกรณ์ แสดงดังรูปภาพ 15

รูปภาพ 15 ชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน



รูปภาพ 16 การติดตั้งชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชันกับถังปฏิกรณ์

3.5 การดำเนินการวิจัย

ช่วงที่หนึ่ง เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น และปริมาณของสารสร้างตะกอน ทำการศึกษาโดยใช้ชุดทดลองการสร้างตะกอน

ช่วงที่สอง เป็นการศึกประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ (1) ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท, (2) การกำจัดสีรีแอคทีฟ, (3) การกำจัดของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด และ (4) การกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

ช่วงที่สาม เป็นการศึกประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ (1) ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท, (2) การกำจัดสีรีแอคทีฟ, (3) การกำจัดของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด, (4) การกำจัดค่าการนำไฟฟ้า และ (5) ผลของความดันในการเดินระบบ

3.5.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น

ใช้น้ำสีรีแอคทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิตร ใส่บีกเกอร์ 7 ใบ ใช้กรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 จากนั้นเติมปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปกวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และกวนช้าที่ 45 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 40 นาที ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ โดยใช้ปิเปตเก็บน้ำที่ความลึกจากระดับผิวน้ำ 2-3 เซนติเมตร จากนั้น นำตัวอย่างน้ำไปคำนวณหาค่าร้อยละของการกำจัดสี โดยใช้สมการ (11)

3.5.2 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอน

ใช้น้ำสีรีแอคทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิตร ใส่บีกเกอร์ 7 ใบ ใช้กรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 จากนั้นเติมปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 500, 1,000, 1500, 2000, 3000 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปกวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และกวนช้าที่ 45 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 40 นาที ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ โดย ใช้ปิเปตเก็บน้ำที่ความลึกจากระดับผิวน้ำ 2-3 เซนติเมตร จากนั้น นำตัวอย่างน้ำไปคำนวณหาค่าร้อยละของการกำจัดสี โดยใช้สมการ (11)

3.5.3 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility test)

ในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน จะทำการทดสอบซ้ำ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ จะทำการสอบความแม่นยำของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร เตรียมในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ปรับค่าพีเอชและเติมปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สภาวะเหมาะสม (จากผลการทดลอง 3.5.1 และ 3.5.2) จากนั้น กวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และกวนช้าที่ 45 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 40 นาที จากนั้น ปั๊มน้ำสีเข้าชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้ความดันเดินระบบที่ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำการเก็บอัตราการไหลของตัวอย่างน้ำที่เวลา 0, 10, 20, 30,

40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 และ 300 นาที จากนั้น นำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท โดยใช้สมการ (10) และทำการทดสอบด้วยสภาวะเช่นเดียวกัน 3 ครั้ง จากนั้น นำค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อคำนวณหาความแม่นยำของระบบ

3.5.4 ศึกษาค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ใช้น้ำสีรีแอคทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร เตรียมในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ไม่มีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นและไม่มีการใส่สร้างสารตะกอน จากนั้น ปั๊มน้ำสีเข้าชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้ความดันเดินระบบที่ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำการเก็บอัตราการไหลของตัวอย่างน้ำที่เวลา 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 และ 300 นาที จากนั้น นำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท โดยใช้สมการ (10)

3.5.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

จากการทดลอง 3.5.4 นำตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ไปคำนวณหาค่าร้อยละของการกำจัดสี โดยใช้สมการ (11)

3.5.6 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

จากการทดลอง 3.5.4 นำตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ไปวิเคราะห์หาค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดและคำนวนหาค่าร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด โดยใช้สมการ (12)

3.5.7 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

จากการทดลอง 3.5.4 นำตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ไปวิเคราะห์หาค่าการนำไฟฟ้าและคำนวณหาค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า โดยใช้สมการ (13)

3.5.8 ศึกษาค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ใช้น้ำสีรีแอคทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร เตรียมในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ปรับค่าพีเอชและเติมปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สภาวะเหมาะสม (จากผลการทดลอง 3.5.1 และ 3.5.2) จากนั้น กวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และกวนช้าที่ 45 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 40 นาที จากนั้น ปั๊มน้ำสีเข้าชุดทดลองระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้ความดันเดินระบบที่ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำการเก็บ

อัตราการไหลของตัวอย่างน้ำที่เวลา 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 และ 300 นาที จากนั้น นำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท โดยใช้สมการ (10) จากนั้น ทำการทดลองซ้ำ โดยการเพิ่มความดันในการเดินระบบเป็น 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3.5.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

จากการทดลอง 3.5.8 นำตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ที่ความดันเดินระบบที่ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปคำนวณหาค่าร้อยละของการกำจัดสี โดยใช้สมการ (11)

3.5.10 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

จากการทดลอง 3.5.8 นำตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ที่ความดันเดินระบบที่ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปวิเคราะห์หาค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดและคำนวนหาค่าร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด โดยใช้สมการ (12)

3.5.11 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

จากการทดลอง 3.5.8 นำตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ที่ความดันเดินระบบที่ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปวิเคราะห์หาค่าการนำไฟฟ้าและคำนวณหาค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า โดยใช้สมการ (13)

3.6 การวิเคราะห์

3.6.1 ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท

ปริมาตรของตัวอย่างน้ำที่ถูกเก็บในช่วงเวลาต่างๆ ถูกนำไปคำนวนเป็นค่าอัตราการไหล (flow rate, *Q)* โดยใช้สมการ (10)

$$J_P = \frac{V}{A \times T} \qquad (10)$$

โดย J_P คือ ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอท มีหน่วยเป็น ลิตรต่อตารางเมตรต่อนาที

V คือ ปริมาตรของเพอมิเอทที่ถูกเก็บ ณ เวลา T มีหน่วยเป็น ลิตร

A คือ พื้นที่เยื่อกรอง มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

T คือ ช่วงระยะเวลาที่ใช้เก็บเพอมิเอท มีหน่วยเป็น นาที

3.6.2 ค่าร้อยละของการกำจัดสี

ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำที่ 543 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-1900 UV-VIS, Shimadzu) ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ถูกนำไปคำนวนเป็นร้อยละการกำจัดสี (% Color Removal) โดยใช้สมการ (11)

$$\%\ \text{Color removal} = \left(1 - \frac{A_f}{A_i}\right) \times 100\% \tag{11}$$

โดย A_i คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีเริ่มต้น

A_f คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีหลังบำบัด

3.6.3 ค่าร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

นำตัวอย่างน้ำที่ถูกเก็บในช่วงเวลาต่างๆ ไปคำนวณเป็นค่าร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (% TDS removal) โดยใช้สมการ (12)

$$\%\ TDS\ \text{removal} = \left(1 - \frac{TDS_f}{\text{TDS}_i}\right) \times 100\% \tag{12}$$

โดย TDS_i คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำสีเริ่มต้น มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

TDS_f คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังบำบัด มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

3.6.4 ค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

นำตัวอย่างน้ำที่ถูกเก็บในช่วงเวลาต่างๆ ไปคำนวณเป็นค่าร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (% EC removal) โดยใช้สมการ (13)

$$\%\ \text{EC removal} = \left(1 - \frac{EC_f}{EC_i}\right) \times 100\% \tag{13}$$

โดย EC_i คือ ค่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสีเริ่มต้น มีหน่วยเป็น ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

EC_f คือ ค่าค่าการนำไฟฟ้าหลังบำบัด มีหน่วยเป็น ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

3.6.3 การวิเคราะห์หาค่าพีเอช

ทำการวัดค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำ โดยใช้เครื่องวัดค่าพีเอช (HQ40D Portable Multi Meter, Hach)

3.6.4 การวิเคราะห์หาค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด โดยใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำ (Cyber ScanCon 110, EUTECH)

3.6.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Statistics Package for Social Sciences (SPSS)

บทที่ 4
ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

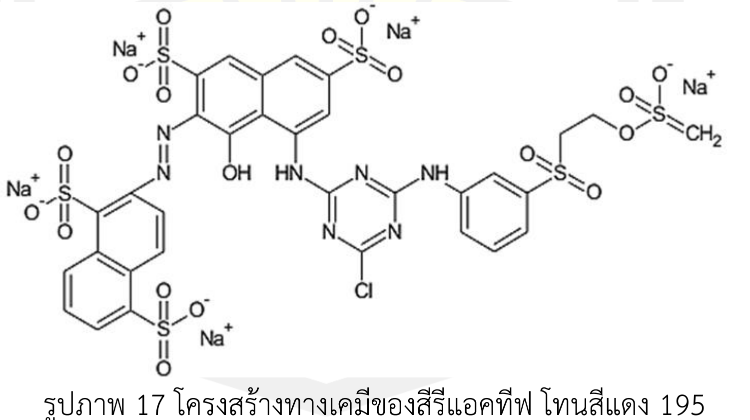
4.1 คุณลักษณะของน้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195

น้ำสีที่ใช้ในการทดลอง ถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยการละลายผงสีในน้ำปราศจากไอออน คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำสี แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณลักษณะของน้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195

Parameter	Value
Dye concentration	1,000 mg/L
pH	10.86
Total Dissolve Solid (TDS)	662 mg/L
Electric Conductivity (EC)	1,339 (µS/cm)

จากตารางที่ 7 พบว่า น้ำสีมีความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชที่วัดได้เท่ากับ 10.86 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำสีมีความเป็นด่างสูง ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ที่วัดได้เท่ากับ 662 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่วัดได้เท่ากับ 1,339 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่ปรากฏ มาจาก Na^{+} และหมู่ SO_3^{-} ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโมเลกุลสีแสดงดังรูปภาพ 17



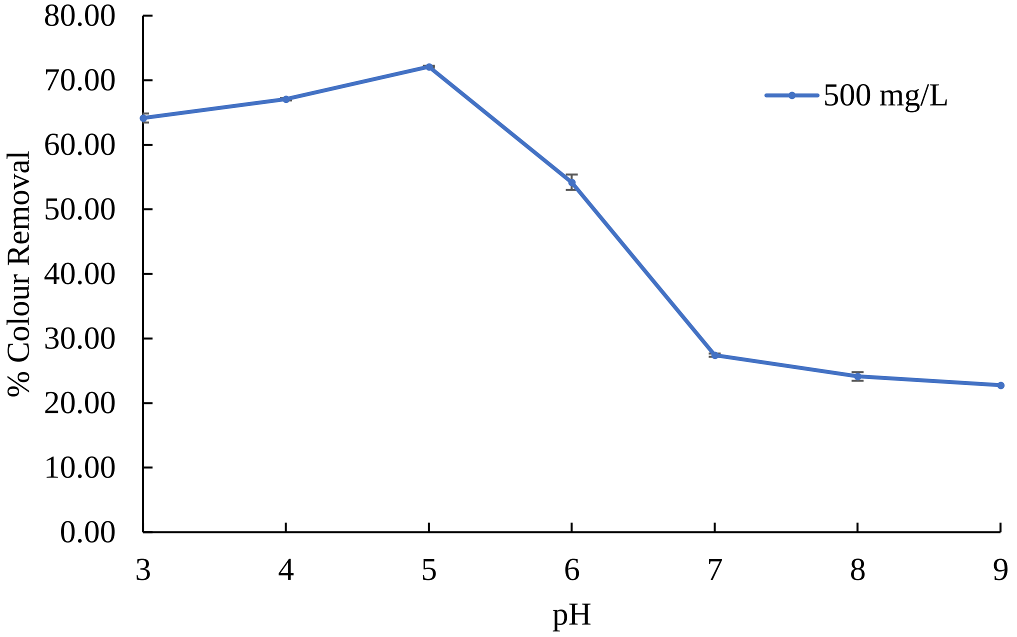
รูปภาพ 17 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195

ที่มา: (Tavares et al., 2020)

4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ

4.2.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น

ในการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำสีให้อยู่ในช่วง 3-9 และควบคุมปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละของการกำจัดสี แสดงดังรูปภาพ 18



รูปภาพ 18 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละของการกำจัดสี

จากรูปภาพ 18 พบว่า ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ช่วงค่าพีเอชเริ่มต้น 3-5 จากนั้น ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลงที่ช่วงพีเอชเริ่มต้น 6-9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

ค่าพีเอชเริ่มต้นยังมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ Li และคณะ (2018) รายงานว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมประจุบวก เช่น Al^{3+} และ $Al(OH)^{2+}$ ที่พีเอชต่ำกว่า 5 ซึ่งอะลูมิเนียมประจุบวกเหล่านี้ มีความสามารถในการทำประจุไฟฟ้าให้เป็นกลาง (Charge neutralization), โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมในรูปของโพลิเมอร์ หรือ $Al(OH)_3$ ที่พีเอชระหว่าง 6-8 ซึ่งอะลูมิเนียมเหล่านี้ มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสามารถดูดซับและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกเปลี่ยนเป็น $Al(OH)_4^-$ จากการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ที่พีเอชมากกว่า 8

จากรูปภาพ 18 เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุดที่พีเอชต่างๆ พบว่า โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 60 ที่ช่วงพีเอชเริ่มต้น 3-5 เนื่องจาก โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมประจุบวก ซึ่งสามารถทำให้ประจุลบของโมเลกุลสีเป็นกลางและทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนสี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่พีเอชเริ่มต้น 5 และอยู่ในช่วงพีเอชเริ่มต้นระหว่าง 3-5 นอกจากนี้ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟอื่นๆ ที่ช่วงพีเอชเป็นกรด แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการกำจัดสีสีรีแอคทีฟ

Coagulant	Dyes	Optimal pH	References
PAC	Reactive Red DB-8	3.5-5.5	Klimiuk et al., 1999
	Reactive Orange ORG	4.5-5.5	
	Reactive Black DN	4.0-5.0	
	Reactive Yellow FN-2R	4.3-4.7	Wong et al., 2007
	Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R, Remazol Brilliant Red F3B	4.0-6.0	Rawi et al., 2016
	Reactive Red 195	3.0-5.0	This study

แม้ว่ากลไกแบบกวาด (Sweep coagulation mechanism) มีประสิทธิภาพน้อยกว่ากลไกการทำประจุให้เป็นกลาง (Charge neutralization mechanism) เนื่องจาก กลไกแบบกวาดมีความสามารถในการทำประจุให้เป็นกลางอ่อนกว่า Shi และคณะ (2007) รายงานว่า การกำจัดสีได้อย่างเต็มที่ ควรเป็นกลไกแบบกวาด ซึ่งเกิดขึ้นที่สภาวะที่มีปริมาณของสารสร้างตะกอนมากและพีเอชสูง

4.2.2 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอน

ในการศึกษาผลของปริมาณสารสร้างตะกอน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำสีให้อยู่ในช่วง 3-9 และปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์อยู่ในช่วง 500-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละของการกำจัดสี แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละของการกำจัดสี

pH	Colour removal (%mean ± SD)					
	500 mg/L	1,000 mg/L	1,500 mg/L	2,000 mg/L	3,000 mg/L	5,000 mg/L
3	64.15±0.70	83.05±0.41	88.62±0.05	92.43±0.10	95.67±0.03	**98.94±0.12**
4	67.06±0.18	83.26±0.49	90.47±0.06	92.25±0.02	97.59±0.06	80.01±3.63
5	**72.10±0.14**	**85.81±0.99**	89.42±0.08	93.56±0.15	97.67±0.11	66.70±1.02
6	54.21±1.19	85.57±0.00	**93.05±0.16**	96.10±0.32	98.72±0.16	45.07±0.68
7	27.42±0.25	57.31±0.47	90.66±0.38	96.70±0.16	99.46±0.02	48.12±1.36
8	24.12±0.67	50.93±3.75	82.00+0.06	96.20±0.34	99.45±0.02	41.91±0.92
9	22.77±0.01	33.93±0.21	87.53±0.05	**96.73±0.19**	**99.47±0.00**	38.52±2.09

Note: bold values are the highest percentage of colour removal of each PAC dosage.

จากตารางที่ 9 พบว่า ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จาก 500 ไป 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง ที่ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นปริมาณที่มากเกินพอ ส่งผลให้โมเลกุลของสีกลับสู่สภาวะเสถียรตามเดิม (Re-stabilization)

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุดในแต่ละปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ 500-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุดอยู่ในช่วงพีเอชเป็นกรด และปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุดอยู่ในช่วงพีเอชเป็นด่าง และปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุดอยู่ในพีเอชเป็นกรด อาจเนื่องมาจากโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณมากและถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมประจุบวกในปริมาณมาก ซึ่งทำให้ประจุของโมเลกุลสีเป็นกลางและทำให้เกิดการรวมตัวของโมเลกุลสีอย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุด พบว่า ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้น 9 มีค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับ 99.47±0.00 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Shi และคณะ (2007) ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.2.3 สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ

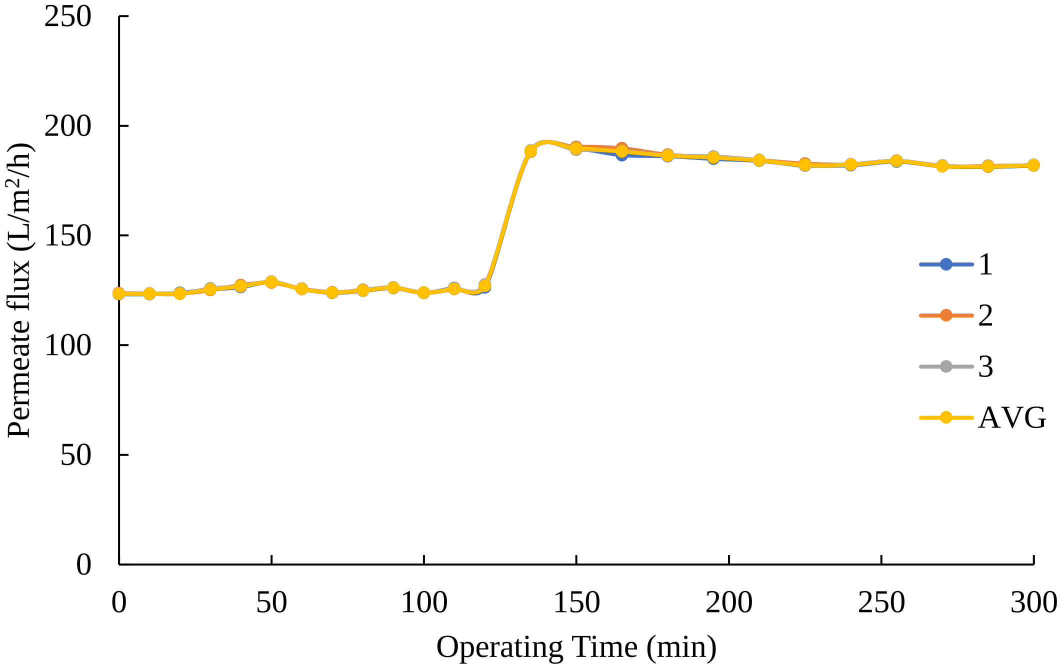
ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ จะเลือกจากสภาวะจากปริมาณของสารสร้างตะกอนและค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุด เนื่องจากค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุด จะเป็นบ่งบอกถึงการเกิดตะกอนสีได้มากที่สุด

จากตารางที่ 9 เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดสีสูงสุด พบว่า ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้น 7, 8 และ 9 มีค่าร้อยละของการกำจัดสีเท่ากับ 99.46±0.02, 99.45±0.02 และ 99.47±0.00 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าร้อยละของการกำจัดสีที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA พบว่า ค่าร้อยละของการกำจัดสีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 คือ ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ช่วงพีเอชเริ่มต้น 7-9

เนื่องจาก น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 มีค่าพีเอชเริ่มต้น 10.86 เพื่อลดการใช้สารเคมีในการปรับค่าพีเอช เพราะฉะนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 คือ ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้น 9

4.3 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility test)

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ได้ทำการทดสอบซ้ำ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดลองกับน้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้น 9 และปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยทำการทดสอบด้วยสภาวะเช่นเดียวกัน 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ได้มาคำนวณหาความแม่นยำของระบบทางสถิติ จากรูปภาพ 19 แสดงค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทในช่วงเวลาต่างๆ พบว่า การทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของทั้ง 3 การทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ดังนั้น การทดสอบซ้ำของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีความแม่นยำถึงร้อยละ 95



รูปภาพ 19 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

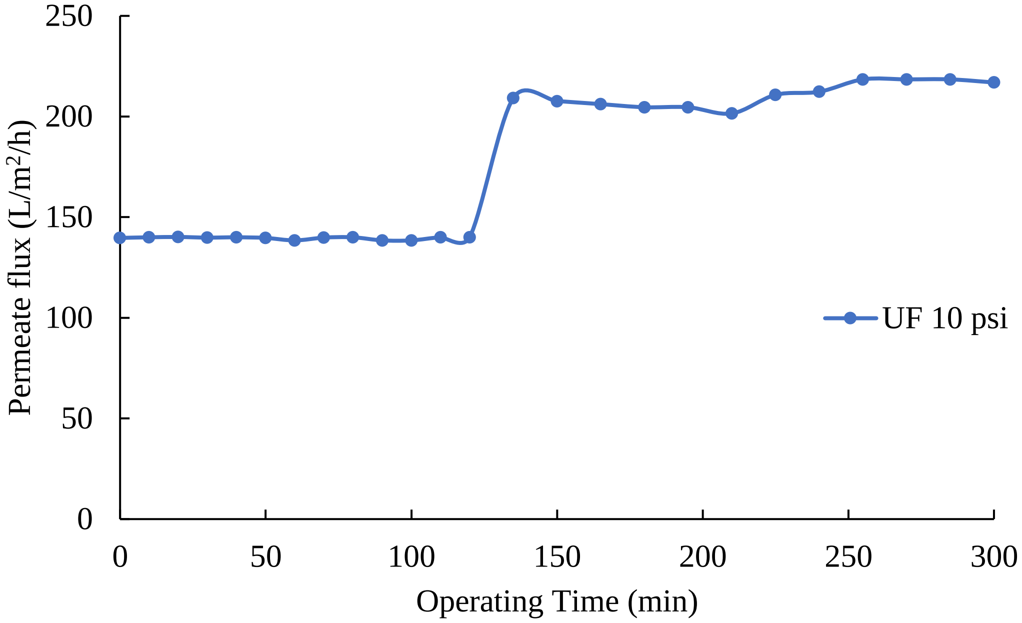
4.4.1 ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟโทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ไม่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 20

จากรูปภาพ 20 พบว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 138.46-140.15 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 0-120 นาที และมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 201.54-218.46 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 135-300 นาที

จากรูปภาพ 20 จะเห็นได้ว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท 2 ช่วง เนื่องจาก ความดันในการเดินระบบลดลงหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 120 นาที เมื่อปรับความดันในการเดินระบบให้กลับมาคงที่ตามเดิม ทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันเพิ่มขึ้นที่ช่วงเวลา 120-135 นาที

จากรูปภาพ 20 จะเห็นได้ว่า ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาในการเดินระบบ 300 นาที ไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดฟาวลิง



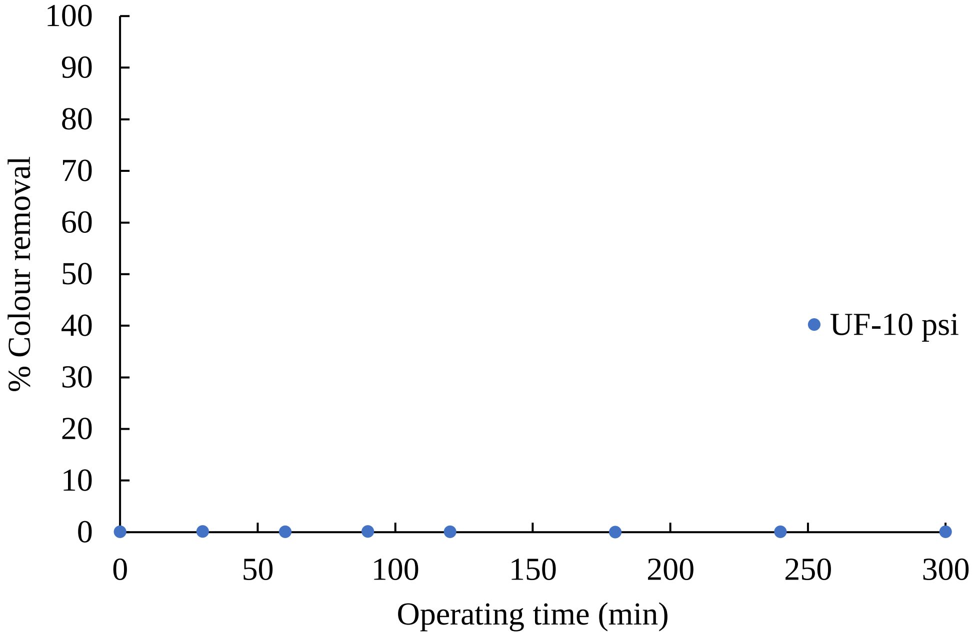
รูปภาพ 20 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

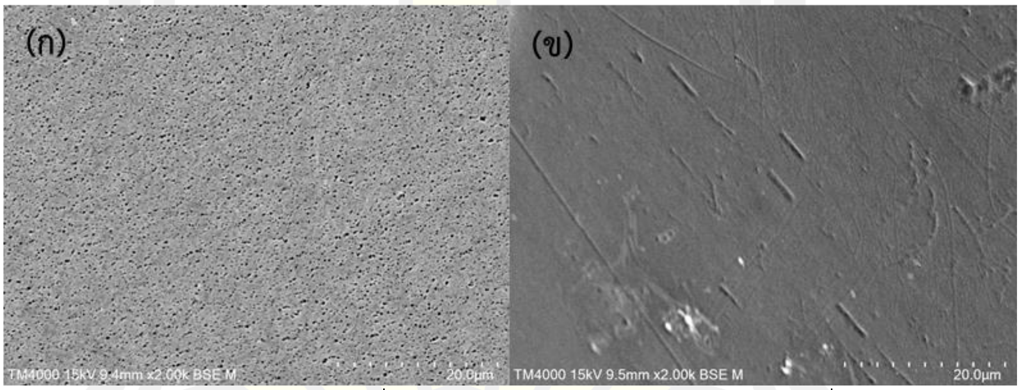
ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ไม่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าร้อยละของการกำจัดสีหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 21

จากรูปภาพ 21 พบว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าร้อยละของการกำจัดสีอยู่ที่ 0.03, 0.10, 0.07, 0.10, 0.07, 0.00, 0.03 และ 0.03 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

จากรูปภาพ 22 เมื่อนำตัวอย่างเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่า ผิวหน้าของเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีโมเลกุลของสีเกาะอยู่บนผิวของเยื่อกรอง แต่ไม่มีการอุดตัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195



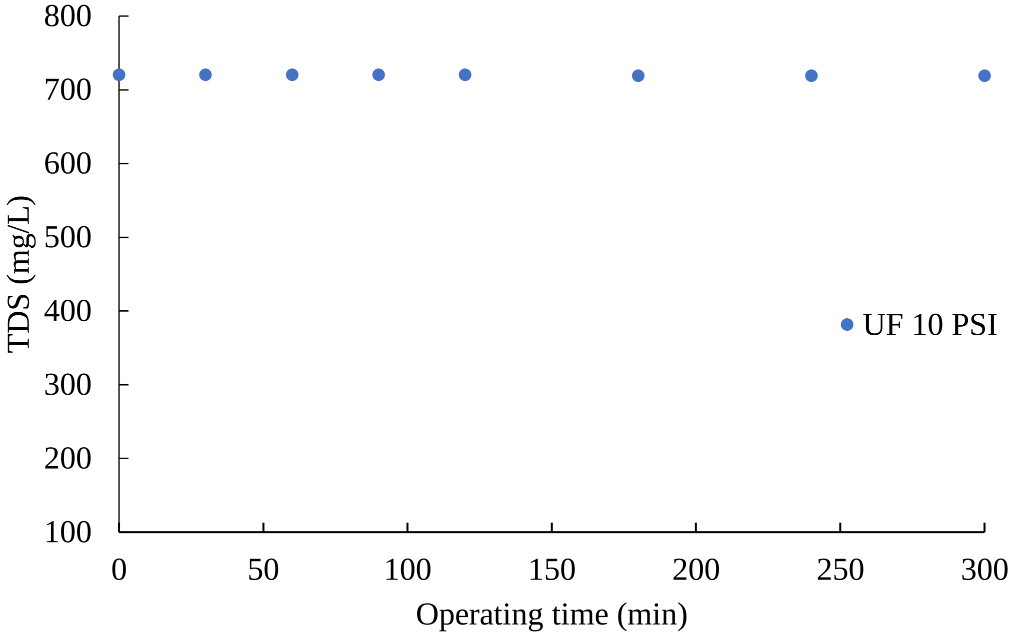
รูปภาพ 21 ค่าร้อยละของการกำจัดสีหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปภาพ 22 ลักษณะของผิวหน้าเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน (ก) เยื่อกรองสะอาด,
(ข) เยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

4.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ไม่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำสีมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้น 722 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 23



รูปภาพ 23 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ

จากรูปภาพ 23 พบว่า มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิล เตรชันอยู่ที่ 720, 720, 720, 720, 720, 719, 719, และ 719 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 0.28, 0.28, 0.28, 0.28, 0.28, 0.42, 0.42 และ 0.42 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด พบว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ไม่สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

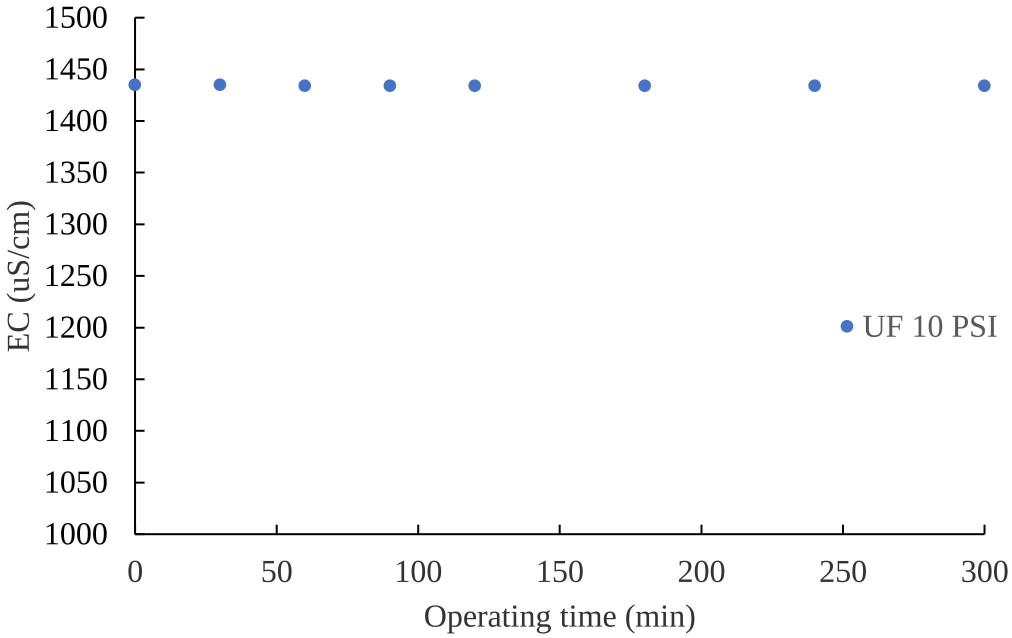
4.4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ไม่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำสีมีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น 1,437 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 24

จากรูปภาพ 24 พบว่า มีค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชันอยู่ที่ 1435, 1435, 1434, 1434, 1434, 1434, 1434, และ 1434 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงเวลา 0-300

นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 0.14, 0.14, 0.21, 0.21, 0.21, 0.21, 0.21 และ 0.21 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ไม่สามารถกำจัดค่าการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

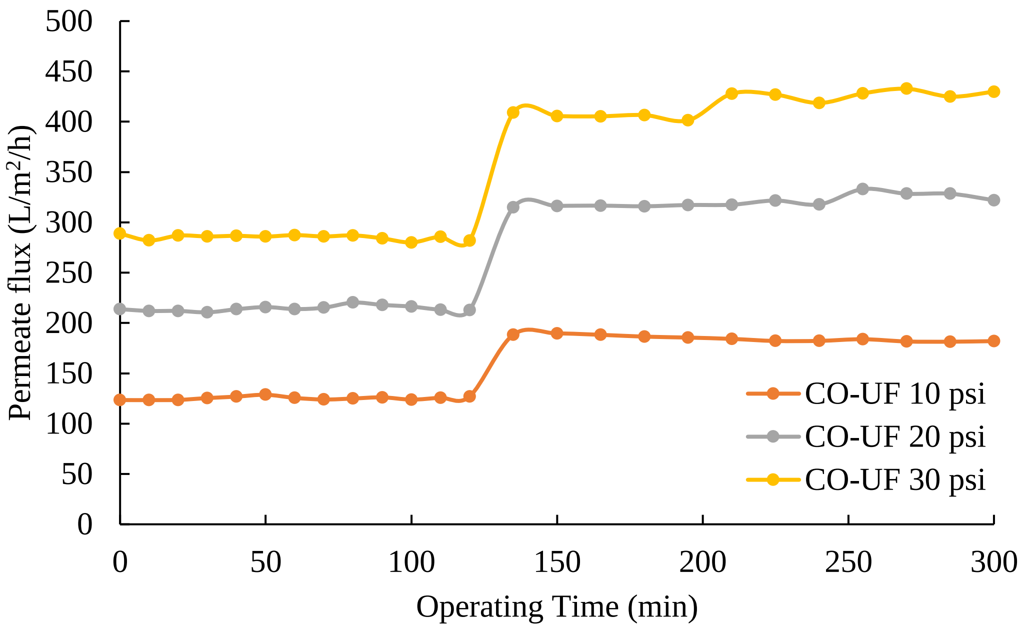


รูปภาพ 24 ค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

4.5.1 ค่าฟลักซ์ของเพอมิเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 25



รูปภาพ 25 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปภาพ 25 พบว่า กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนี้

ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท อยู่ระหว่าง 123.38-128.72 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 0-120 นาที และมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 181.44-189.64 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 135-300 นาที

ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท อยู่ระหว่าง 210.62-220.31 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 0-120 นาที และมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 314.92-333.08 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 135-300 นาที

ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท อยู่ระหว่าง 280.00-288.77 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 0-120 นาที และมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 401.38-432.77 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 135-300 นาที

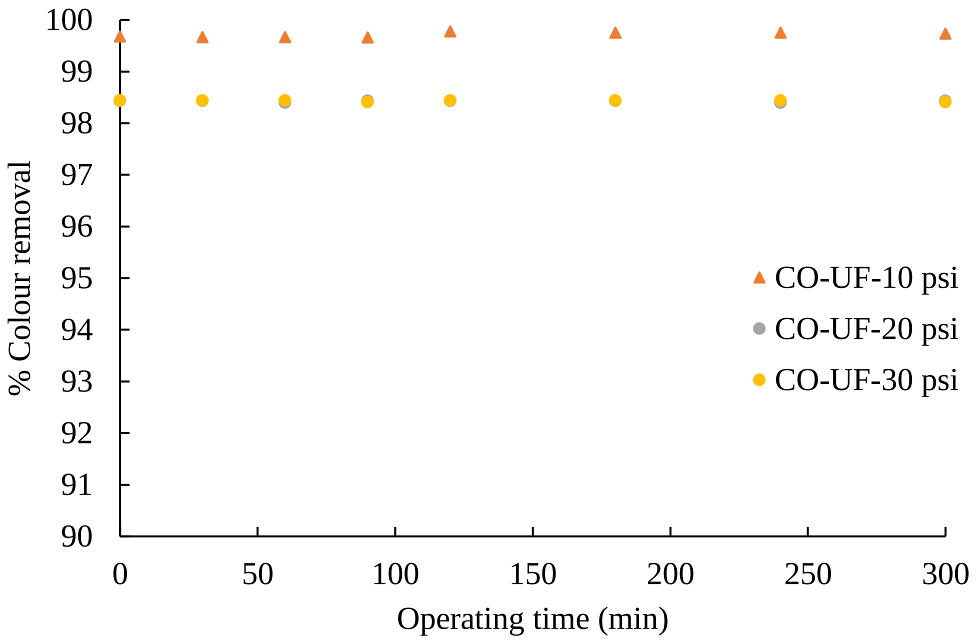
เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท พบว่า ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันของระบบเป็นการเพิ่มความดันรวม (ΔP) (ตามสมการ 7) ส่งผลให้น้ำสีผ่านเยื่อกรองได้เพิ่มขึ้น

จากรูปภาพ 25 จะเห็นได้ว่า ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30

ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาในการเดินระบบ 300 นาที ไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดฟาวลิง

4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าร้อยละของการกำจัดสีของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 26



รูปภาพ 26 ค่าร้อยละของการกำจัดสีของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

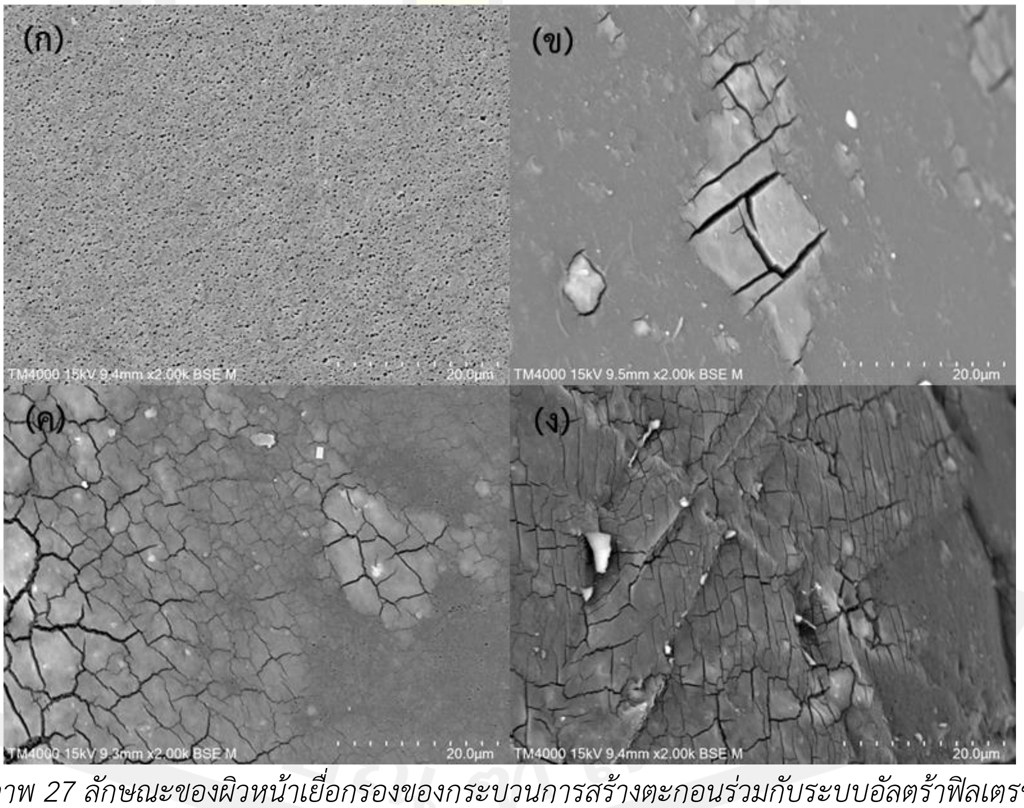
จากรูปภาพ 26 พบว่า กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าร้อยละของการกำจัดสี ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนี้

ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าร้อยละของการกำจัดสีอยู่ที่ 99.68, 99.67, 99.67, 99.66, 99.78, 99.75, 99.75 และ 99.73 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าร้อยละของการกำจัดสีอยู่ที่ 98.43, 98.43, 98.40, 98.43, 98.43, 98.43, 98.40 และ 98.43 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าร้อยละของการกำจัดสีอยู่ที่ 98.44, 98.44, 98.44, 98.41, 98.44, 98.44, 98.44 และ 98.41 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการกำจัดสีสูงสุด พบว่า ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 99.78 ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 98.43 และที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 98.44 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความดันในการเดินระบบ ทำให้ค่าร้อยละของการกำจัดสีลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มอัตราการไหลหรือความเร็วในการป้อนน้ำสีเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือนไปตามคาร์ทริดจ์ของเยื่อกรองแบบเส้นใยกลวง ส่งผลให้การก่อตัวตะกอนสีและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์บนพื้นผิวของเยื่อกรองลดลง (Liang et al., 2015) ซึ่งแสดงดังรูปภาพ 27



รูปภาพ 27 ลักษณะของผิวหน้าเยื่อกรองของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

(ก) เยื่อกรองสะอาด, (ข) เยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

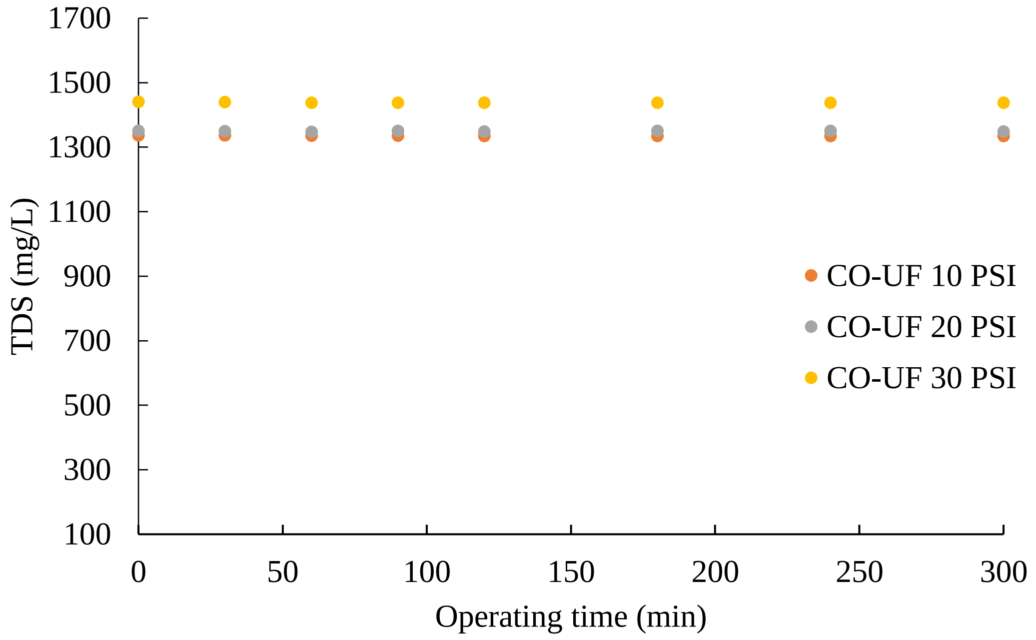
(ค) เยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

(ง) เยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปภาพ 27 เมื่อนำตัวอย่างเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่า ผิวหน้าของเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีตะกอนสีและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เกาะบนผิวหน้าของเยื่อกรองอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ ผิวหน้าของเยื่อกรองของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันที่ความดัน 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีตะกอนสีและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เกาะบนผิวหน้าของเยื่อกรองอย่างไม่สมบูรณ์และยังมีบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองที่แสดงให้เห็นรูพรุนอย่างชัดเจน

4.5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำสีมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านกระบวนการสร้างตะกอน 1,337, 1,350 และ 1,440 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดันเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 28



รูปภาพ 28 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปภาพ 28 พบว่า กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนี้

ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 1,336, 1,336, 1,335, 1,335, 1,334, 1,334, 1,334 และ 1,334 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 0.05, 0.07, 0.12, 0.12, 0.17, 0.22, 0.17 และ 0.22 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

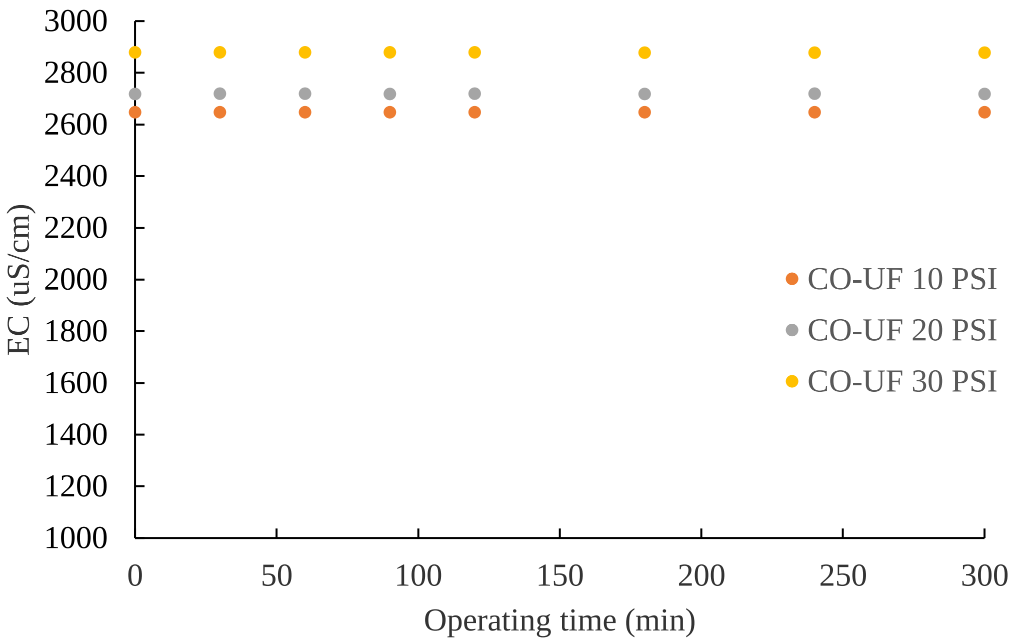
ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 1,350, 1,349, 1,347, 1,350, 1,348, 1,350, 1,350, และ 1,348 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 0.00, 0.07, 0.22, 0.00, 0.15, 0.00, 0.00 และ 0.15 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 1,440, 1,439, 1,437, 1,437, 1,437, 1,437, 1,437, และ 1,437 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ที่ 0.00, 0.07, 0.21, 0.21, 0.21, 0.21, 0.21 และ 0.21 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด พบว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

4.5.4 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน โดยใช้น้ำสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอน และระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ใช้ความดันเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำสีมีค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านกระบวนการสร้างตะกอน 2,650, 2,720 และ 2,880 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบอัล ตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดันเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ และค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน แสดงดังรูปภาพ 29



รูปภาพ 29 ค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จากรูปภาพ 29 พบว่า กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน ที่ความดันในการเดินระบบ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนี้

ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 2,647, 2,647, 2,647, 2,647, 2,647, 2,647, 2,647 และ 2,647 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 0.07, 0.11, 0.11, 0.11, 0.11, 0.11, 0.11 และ 0.11 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 2,717, 2,719, 2,719, 2,717, 2,719, 2,718, 2,719, และ 2,717 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 0.11, 0.04, 0.04, 0.11, 0.04, 0.07, 0.04 และ 0.11 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 2,878, 2,878, 2,878, 2,878, 2,878, 2,877, 2,877 และ 2,877 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที หรือมีค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 0.07, 0.07, 0.07, 0.07, 0.07, 0.10, 0.10 และ 0.10 ที่ช่วงเวลา 0-300 นาที

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา

5.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนของสีรีแอคทีฟ

5.1.1 พีเอชเริ่มต้น

พีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี พบว่า ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ช่วงพีเอชเริ่มต้น 3-5 จากนั้น ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลงที่ช่วงพีเอชเริ่มต้น 6-9 ที่ความเข้มข้นของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

พีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 60 ที่พีเอชเริ่มต้น 3-5 เนื่องจาก โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมประจุบวก ในขณะที่พีเอชเริ่มต้นตั้งแต่ 6 ขึ้นไป สามารถกำจัดสีได้น้อยกว่าร้อยละ 60 เนื่องจาก โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซ์เป็นอะลูมิเนียมในรูปของโพลิเมอร์ หรือ $Al(OH)_3$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

5.1.2 ปริมาณสารสร้างตะกอน

ค่าร้อยละของการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 500-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลให้ค่าร้อยละของการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าร้อยละของการกำจัดสีลดลง ที่ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นปริมาณที่มากเกินพอ ส่งผลให้โมเลกุลของสีกลับสู่สภาวะเสถียรตามเดิม (Re-stabilization)

5.1.3 สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ

สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง 195 คือ ปริมาณของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้น 9

5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

5.2.1 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 138.46-140.15 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 0-120 นาที และมีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทอยู่ระหว่าง 201.54-218.46 ลิตรต่อตางรางเมตรต่อชั่วโมง ที่ช่วงเวลา 135-300 นาที และค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของ

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีแนวโน้มลดลงหรือไม่เกิดฟาวลิง ตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ 300 นาที

5.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟ

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ

5.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด แต่น้ำสีมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดน้อยกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560

5.2.4 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

5.3.1 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท

ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันของระบบเป็นการเพิ่มความดันรวม ส่งผลให้น้ำสีผ่านเยื่อกรองได้เพิ่มขึ้น และค่า ฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของระบบอัลตร้าฟิลเตรชันไม่มีแนวโน้มลดลงหรือไม่เกิดฟาวลิง ตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ 300 นาที

5.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟ

ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 99.78, ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 98.43 และที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถกำจัดสีได้สูงสุดร้อยละ 98.44 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความดันในการเดินระบบมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟ ดังนั้น ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นความดันที่ใช้ในการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบอัลตร้าฟิลเตรชัน

5.3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันที่ความดัน 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความดันในการเดินระบบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และน้ำสีมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดน้อยกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560

5.3.4 ความสามารถในการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

ระบบอัลตร้าฟิลเตรชันที่ความดัน 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าการนำไฟฟ้า

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 น้ำสีที่ใช้เป็นน้ำสีที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งคุณลักษณะของน้ำสีมีความแตกต่างจากคุณลักษณะของน้ำเสียจริง ดังนั้นจึงควรมีศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟของกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบอัลตร้าฟิลเตรชันจากน้ำเสียจริงด้วย

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

รัตนา จิระรัตนานนท์. (2543). *กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์* (พิมพ์ครั้งที่ 2). ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ไทยเส็ง.

Allègre, C., Moulin, P., Maisseu, M., & Charbit, F. (2006). Treatment and reuse of reactive dyeing effluents. *Journal of Membrane Science*, *269*(1–2), 15–34.

Alventosa-deLara, E., Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M. I., & Iborra-Clar, M. I. (2012). Ultrafiltration technology with a ceramic membrane for reactive dye removal: optimization of membrane performance. *Journal of Hazardous Materials*, *209*, 492–500.

Aouni, A., Fersi, C., Cuartas-Uribe, B., Bes-Pía, A., Alcaina-Miranda, M. I., & Dhahbi, M. (2012). Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes. *Desalination*, *297*, 87–96. https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.04.022

Aryanti, N., Sandria, F. K. I., Putriadi, R. H., & Wardhani, D. H. (2017). Evaluation of micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) membrane for dye removal of synthetic remazol dye wastewater. *Engineering Journal*, *21*(3), 23–35.

Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.

Balkaya, N., & Büker, N. (2017). Use of aluminium-coagulated water treatment residue in the treatment of dye containing wastewater. *Desalination and Water Treatment*, *93*, 297–302.

Barrera-Díaz, C. E., Balderas-Hernández, P., & Bilyeu, B. (2018). Electrocoagulation: Fundamentals and prospectives. In *Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (pp. 61–76). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1

Berradi, M., & el Harfi, A. (2017). Discoloration of charged models wastewater with reactive and dispersed dyes by the combined process of coagulation-ultrafiltration. *J. Mater. Environ. Sci*, *8*(5), 1762–1769.

Chakraborty, J. N. (2014). Dyeing with reactive dye. *Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles; Woodhead Publishing: New Delhi, India*, 61–76.

Chattopadhyay, D. P. (2011). Chemistry of dyeing. In *Handbook of textile and industrial dyeing* (pp. 150–183). Elsevier.

Chen, X., Zhao, Y., Moutinho, J., Shao, J., Zydney, A. L., & He, Y. (2015). Recovery of small dye molecules from aqueous solutions using charged ultrafiltration membranes. *Journal of Hazardous Materials*, *284*, 58–64.

Clark, M. (2011). Fundamental principles of dyeing. *Handbook of Textile and Industrial Dyeing; Woodhead Publishing: Cambridge, UK*, *1*, 1–27.

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Miino, M. C., & Damiani, S. (2019). Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*, *236*, 727–745.

Dey, A. K., & Dey, A. (2021). Selection of optimal processing condition during removal of Reactive Red 195 by NaOH treated jute fibre using adsorption. *Groundwater for Sustainable Development*, *12*, 100522.

Dey, S., & Islam, A. (2012). A review on textile wastewater characterization in Bangladesh. *Resour Environ*, *5*(1), 15–44.

Gita, S., Hussan, A., & Choudhury, T. G. (2017). Impact of textile dyes waste on aquatic environments and its treatment. *Environ. Ecol*, *35*(3C), 2349–2353.

Grishanov, S. (2011). Structure and properties of textile materials. In *Handbook of textile and industrial dyeing* (pp. 28–63). Elsevier.

Hassaan, M. A., el Nemr, A., & Hassaan, A. (2017). Health and environmental impacts of dyes: mini review. *American Journal of Environmental Science and Engineering*, *1*(3), 64–67.

Jadhav, I., Vasniwal, R., Shrivastava, D., & Jadhav, K. (2016). Microorganism-based treatment of azo dyes. *Journal of Environmental Science and Technology*, *9*(2), 188.

Jiang, M., Ye, K., Deng, J., Lin, J., Ye, W., Zhao, S., & van der Bruggen, B. (2018). Conventional ultrafiltration as effective strategy for dye/salt fractionation in textile wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, *52*(18), 10698–10708.

Klimiuk, E., Filipkowska, U., & Korzeniowska, A. (1999). Effects of pH and coagulant dosage on effectiveness of coagulation of reactive dyes from model wastewater by polyaluminium chloride (PAC). *Polish Journal of Environmental Studies*, *8*, 73–80.

Lewis, D. M. (2011). The chemistry of reactive dyes and their application processes. In *Handbook of textile and industrial dyeing* (pp. 303–364). Elsevier.

Li, R., Gao, B., Sun, J., & Yue, Q. (2018). Coagulation behavior of kaolin-anionic surfactant simulative wastewater by polyaluminum chloride-polymer dual coagulants. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(8), 7382–7390.

Liang, C.-Z., Sun, S.-P., Zhao, B.-W., & Chung, T.-S. (2015). Integration of nanofiltration hollow fiber membranes with coagulation–flocculation to treat colored wastewater from a dyestuff manufacturer: a pilot-scale study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *54*(44), 11159–11166.

Ma, X., Chen, P., Zhou, M., Zhong, Z., Zhang, F., & Xing, W. (2017). Tight ultrafiltration ceramic membrane for separation of dyes and mixed salts (both NaCl/Na2SO4) in textile wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *56*(24), 7070–7079.

Nopkhuntod, S., Dararat, S., & Yimrattanabovorn, J. (2012). Removal of reactive dyes from wastewater by shale. *Sonklanakarin Journal of Science and Technology*, *34*(1), 117.

Pal, P. (2017). *Industrial water treatment process technology*. Butterworth-Heinemann.

Perng, Y.-S., & Bui, H. M. (2014). Decolorization of reactive dyeing wastewater by Poly Aluminium Chloride. *Journal of Vietnamese Environment*, *5*(1), 8–11.

Rawi, S. N. M., Ab Wahid, Z., Nasrullah, M., & Najib, N. W. A. Z. (2016). Pretreatment of reactive dye from textile wastewater by coagulation technology. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *3*(12), 1.

Samanta, K. K., Pandit, P., Samanta, P., & Basak, S. (2019). Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation. In *Water in textiles and fashion* (pp. 41–59). Elsevier.

Shammas, N. K. (2005). Coagulation and flocculation. In *Physicochemical treatment processes* (pp. 103–139). Springer.

Shi, B., Li, G., Wang, D., Feng, C., & Tang, H. (2007). Removal of direct dyes by coagulation: the performance of preformed polymeric aluminum species. *Journal of Hazardous Materials*, *143*(1–2), 567–574.

Swati, S. S. (2017). *STUDY OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF WASTE WATER GENERATED AFTER DYEING WITH REACTIVE DYES*. dspace.daffodilvarsity.edu.bd:8080/handle/20.500.11948/1568

Tavares, M. G. R., Santos, D. H. S., Tavares, M. G., Duarte, J. L. S., Meili, L., Pimentel, W. R. O., Tonholo, J., & Zanta, C. L. P. S. (2020). Removal of reactive dyes from aqueous solution by Fenton reaction: kinetic study and phytotoxicity tests. *Water, Air, & Soil Pollution*, *231*(2), 1–15.

Teh, C. Y., Budiman, P. M., Shak, K. P. Y., & Wu, T. Y. (2016). Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *55*(16), 4363–4389.

Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, *93*(1), 154–168.

Wei, N., Zhang, Z., Liu, D., Wu, Y., Wang, J., & Wang, Q. (2015). Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *23*(6), 1041–1046.

Wong, P. W., Teng, T. T., & Norulaini, N. A. R. N. (2007). Efficiency of the coagulation-flocculation method for the treatment of dye mixtures containing disperse and reactive dye. *Water Quality Research Journal*, *42*(1), 54–62.

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(2), 1193–1226.

Zonoozi, M. H., Moghaddam, M. R. A., & Arami, M. (2009). Coagulation/flocculation of dye-containing solutions using polyaluminium chloride and alum. *Water Science and Technology*, *59*(7), 1343–1351.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกฤษณะ ธรรมชัย
วันเกิด	18 กันยายน พ.ศ. 2532
สถานที่เกิด	ร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1/1 ถ. ราชการดำเนิน ต. ในเมือง อ. เมืองร้อยเอ็ด จ. ร้อยเอ็ด 45000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2548 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย จังหวัดร้อยเอ็ด
	พ.ศ. 2555 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยศิลปากร
	พ.ศ. 2565 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม