

รูปแบบการม้วนเมมเบรนโคโตะซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม

นางสาวชญาภา ภูชัยนันท์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROLLING CONFIGURATION OF CHITOSAN MEMBRANE AS SPIRAL WOUND MODULE FOR
DYE WASTEWATER TREATMENT

Miss Chayapa Phuchaiyanan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

ชญาภา ภูชัยนันท์ : รูปแบบการม้วนเมมเบรนไคโตซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม (ROLLING CONFIGURATION OF CHITOSAN MEMBRANE AS SPIRAL WOUND MODULE FOR DYE WASTEWATER TREATMENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ชันทอง สุนทรภา, 61 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้เตรียมมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวหลายรูปแบบเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมรวมจากโรงงาน กรณีศึกษาด้วยเมมเบรนไคโตซาน 3 ชนิด คือ แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์มีการเชื่อมขวาง เมมเบรนทั้งสามให้ค่ามอดูลสัมพัทธ์กับน้ำเท่ากับ 77.8 ± 1.3 , 92.1 ± 1.1 และ 70.2 ± 1.7 องศา ตามลำดับ แสดงถึงสมบัติความชอบน้ำจากมากไปน้อย ดังนี้ แบบคอมพอสิต > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง เมื่อนำเมมเบรนทั้งสามมาทำเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบไม่มีสแพเซอร์ พบว่ามอดูลที่เตรียมจากแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางที่ความยาว 30, 60 และ 90 ซม. มีค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์เท่ากับ 3.1, 1.1 และ 0.5 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ จากแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางเท่ากับ 1.2, 0.3 และ 0.2 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ และจากแบบคอมพอสิตเชื่อมขวางเท่ากับ 188.3, 12.9 และ 7.9 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ จากการใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการเพอร์แควเพอเรนซ์ที่ -0.7 บาร์ พบว่าน้ำหลังการบำบัดจากมอดูลทุกแบบมีลักษณะใส แต่ค่าซีไอดียังคงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ยกเว้นมอดูลที่เตรียมจากแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. โดยมอดูลชนิดนี้ให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เท่ากับ 0.4 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. มีคุณภาพน้ำหลังการบำบัดในเทอมของของแข็งทั้งหมด ซีไอดี และสีเท่ากับ 1.2 ± 0.3 ก./ล., 0.3 ± 0.1 ก./ล. และ 4.9 ± 0.2 มก./ล. ตามลำดับ จากน้ำเสียสีย้อมตั้งต้นเท่ากับ 6.6 ± 1.0 ก./ล., 4.8 ± 0.2 ก./ล. และ 17.4 ± 0.2 มก./ล. ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 82.0 ± 3.3 , 93.6 ± 2.6 และ 71.9 ± 1.2 ตามลำดับ ผลการศึกษาใช้สแพเซอร์ 2 ชนิด คือ ผ้าสปันปอนด์และตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกที่ความยาว 3 ขนาด คือ 30, 60 และ 90 ซม. พบว่ามอดูลที่ใช้สแพเซอร์ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกให้เพอร์มิเอตฟลักซ์มากกว่าแต่ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่ามอดูลที่ใช้สแพเซอร์ผ้าสปันปอนด์ สรุปว่ารูปแบบการม้วนเมมเบรนไคโตซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่เหมาะสมเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการเพอร์แควเพอเรนซ์ที่ -0.7 บาร์ คือใช้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. ม้วนรอบแกนกลางเจาะรูไปพร้อมกับสแพเซอร์ผ้าสปันปอนด์ยาว 90 ซม. จะให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เท่ากับ 7.8 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ซีไอดี และสีเท่ากับร้อยละ 74.4 ± 2.7 , 90.7 ± 1.9 และ 29.8 ± 3.1 ตามลำดับ สามารถใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมเป็นเวลาอย่างน้อย 21 วัน โดยเพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลงจาก 8.0 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. ในวันที่ 1 เหลือ 3.2 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. ในวันที่ 21 และมีค่าซีไอดีเพิ่มขึ้นจาก 0.33 ± 0.20 ก./ล. ในวันที่ 1 เป็น 0.40 ± 0.09 ก./ล. ในวันที่ 21

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5571989223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: SPIRAL WOUND MODULE / CHITOSAN MEMBRANE / DYE WASTEWATER TREATMENT / PERVAPORATION PROCESS.

CHAYAPA PHUCHAIYANAN: ROLLING CONFIGURATION OF CHITOSAN MEMBRANE AS SPIRAL WOUND MODULE FOR DYE WASTEWATER TREATMENT. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. KHANTONG SOONTARAPA, 61 pp.

Various configurations of spiral wound modules were prepared from chitosan membrane for treating dye wastewater from a factory. The investigated membrane types were uncrosslinked dense, crosslinked dense and crosslinked composite on spunbond support. Their contact angles were 77.8 ± 1.3 , 92.1 ± 1.1 and 70.2 ± 1.7 degree, respectively. The hydrophilicity sequence was crosslinked composite > uncrosslinked dense > crosslinked dense membranes. On spiral wound modules, their pure water permeabilities with different length of 30, 60, 90 cm were studied. Those of uncrosslinked dense modules were 3.1, 1.1 and 0.5 cc/hr-m²-psi, of crosslinked dense modules were 1.2, 0.3 and 0.2 cc/hr- m²-psi and of crosslinked composite were 188.3, 12.9 and 7.9 cc/hr-m²-psi, respectively. On treating of dye wastewater with pervaporation process at -0.7 bar, the clear effluent was obtained in every module configurations. However, the COD values could meet the effluent standard only from the 90 cm crosslinked dense module. The permeate flux and its quality in term of total solid, COD and color obtained from this module were 0.4 ± 0.0 cc/hr-m², 1.2 ± 0.3 g/L, 0.3 ± 0.1 g/L and 4.9 ± 0.2 mg/L, respectively. According to the raw quality of 6.6 ± 1.0 g/L, 4.8 ± 0.2 g/L and 17.4 ± 0.2 mg/L, its treatment efficiencies were $82.0 \pm 3.3\%$, $93.6 \pm 2.6\%$ and $71.9 \pm 1.2\%$, respectively. The spacer influence of spunbond and plastic wire screen with 30, 60, 90 cm length were investigated in this study. It was found that the module with wire screen spacer provided higher flux but lower effluent quality than one with spunbond spacer. It could be concluded that the optimum configuration of a spiral wound module for treating dye wastewater with pervaporation process at -0.7 bar was by rolling a 90 cm crosslinked dense chitosan membrane together with a 90 cm spunbond spacer around a perforated core. Its permeate flux and removal efficiencies on total solid, COD and color were 7.8 ± 0.0 cc/hr-m², $74.4 \pm 2.7\%$, $90.7 \pm 1.9\%$ and $29.8 \pm 3.1\%$, respectively. The flux was decreased from 8.0 ± 0.0 cc/hr-m² to 3.2 ± 0.0 while the COD was increased from 0.33 ± 0.20 g/L to 0.40 ± 0.09 g/L on 21 days operation life.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature

Science Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย ตรวจสอบแก้ไข และติดตามความก้าวหน้ามาโดยตลอด ผู้ทำวิจัยรู้สึกซาบซึ้ง ในความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภาเป็นอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในความอนุเคราะห์เครื่องวัดมุมสัมผัส

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเมมเบรนเพื่อใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท แปซิฟิคการทอ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียจากสีย้อมเพื่อใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธุ์ และดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่จากภาควิชาเคมีเทคนิค และหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือเรื่องการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ สนับสนุน และให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สีย้อมและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	3
2.2 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน	4
2.3 เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane)	6
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	10
3.1 วัสดุดิบ	10
3.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	10
3.3 การทดสอบสมบัติของเมมเบรน.....	10
3.3.1 ความสามารถทนต่อแรงดึง.....	10
3.3.2 ความชอบน้ำของเมมเบรน	12

3.3.3 การศึกษาค่า Molecular weight cutoff (MWCO) ของเมมเบรน.....	13
3.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	14
3.4 การเตรียม Calibration curve หาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-VIS Spectrophotometer.....	14
3.5 วิธีการทำมอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว	15
3.6 วิธีการดำเนินการศึกษา	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	17
4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน	17
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของเมมเบรน.....	17
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเมมเบรนไคโตซาน	18
4.1.3 ผลการทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน.....	19
4.1.4 ผลการศึกษาค่า Molecular weight cutoff (MWCO) ของเมมเบรน	21
4.2 ผลการศึกษาสร้าง Calibration curve สำหรับวัดความเข้มข้นสีของน้ำเสีย.....	22
4.3 คุณภาพน้ำเสียี่ยม	23
4.4 ผลการศึกษารูปแบบการม้วนเมมเบรนเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวกรณีไม่มี Spacer.....	24
4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล.....	24
4.4.2 ผลของความยาวเมมเบรนต่อการบำบัดน้ำเสียี่ยม	26
4.5 ผลการศึกษารูปแบบการม้วนเมมเบรนเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวในกรณีมี Spacer.....	28
4.5.1 ผลการศึกษาสมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบมี Spacer	29
4.5.2 ผลการบำบัดน้ำเสียี่ยมของมอดูลแบบมี Spacer	31
4.6 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของมอดูลในการบำบัดน้ำเสียี่ยม.....	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	36
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	36

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
รายการอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	42
ภาคผนวก ก.....	43
ภาคผนวก ข.....	49
ภาคผนวก ค.....	52
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	61



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น .	19
ตารางที่ 2 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ของเมมเบรน แบบคอมพอสิต	19
ตารางที่ 3 ค่ามอดุลัสของเมมเบรนไคโตซาน.....	20
ตารางที่ 4 ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน.....	21
ตารางที่ 5 คุณภาพของน้ำเสียที่ย้อมติด	23
ตารางที่ 6 สมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว.....	25
ตารางที่ 7 เพอร์มิเอตฟลักซ์ และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว...	27
ตารางที่ 8 สมบัติทางกลของวัสดุ Spacer.....	29
ตารางที่ 9 สมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมี Spacer	30
ตารางที่ 10 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพอร์แวกพอเรชันของมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมี Spacer	31
ตารางที่ 11 ค่าฟลักซ์เพอร์แวกพอเรชันจากการบำบัดน้ำเสียของมอดูลเมมเบรน แบบเนื้อแน่นมี Spacer.....	32
ตารางที่ 12 ฟลักซ์และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลเมมเบรน แบบเนื้อแน่นแทรก Spacer	33

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ลักษณะของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเชิงพาณิชย์	6
รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	7
รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของไคติน.....	7
รูปที่ 4 ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างเมมเบรนเพื่อการทดสอบแรงดึง	11
รูปที่ 5 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล	12
รูปที่ 6 ชุดทดสอบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ.....	13
รูปที่ 7 มอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว.....	15
รูปที่ 8 แผนภาพชุดการทดลอง	16
รูปที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน	17
รูปที่ 10 โครงสร้างเชื่อมขวางไอออนิกของไคโตซานด้วยกรดซัลฟิวริก	18
รูปที่ 11 ภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซาน 3 แบบ	18
รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน.....	21
รูปที่ 13 กราฟ Molecular weight cutoff ของเมมเบรน 3 ชนิด.....	22
รูปที่ 14 ลักษณะสีของน้ำเสียที่ย้อมติดก่อนการบำบัด	24
รูปที่ 15 ผลของความยาวเมมเบรนต่อสมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลเมื่อใช้ความดัน เป็นแรงขับเคลื่อน	25
รูปที่ 16 ผลของความยาวเมมเบรนต่อฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของมอดูล เมื่อใช้สุญญากาศ เป็นแรงขับเคลื่อน	26
รูปที่ 17 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวชนิดต่าง ๆ	28
รูปที่ 18 ลักษณะสีของน้ำหลังการบำบัดด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวชนิดต่าง ๆ.....	28
รูปที่ 19 ผลการใช้มอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. พร้อม Spacer ผ้าสปันบอนด์ ยาว 90 ซม. บำบัดน้ำเสียที่ย้อมเป็นเวลา 30 วัน.....	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกชีวิตใช้อุปโภคและบริโภคในครัวเรือน นอกจากนี้ยังเป็นหนึ่งในปัจจัยการผลิตของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งจัดเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่เป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้าย ผ้าผืน ให้เป็นวัตถุดิบสำเร็จรูปที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง หรือนำไปเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลาย (เครื่องนุ่งห่ม) หรืออาจเป็นการตกแต่งสนองความต้องการของแฟชั่น โดยนำสินค้าขั้นปลาย (เครื่องนุ่งห่ม) มาผ่านกระบวนการฟอกย้อมฯ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมฯ ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีและสีย้อมโดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมฯ จึงจำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมาก สารเคมีหรือสีบางชนิดละลายน้ำได้ จึงเป็นสาเหตุให้น้ำเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำเสียที่มีกลิ่นและสีที่น่ารังเกียจ วิธีการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ [1] แต่มีข้อจำกัดเรื่องการนำกลับมาใช้ใหม่ต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของวิธีการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่มีประสิทธิภาพ แต่การใช้กระบวนการเมมเบรนยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากมอดูลเมมเบรนที่ใช้กันอยู่ทั้งหมดในปัจจุบันต้องนำเข้าจากต่างประเทศ งานวิจัยก่อนหน้านี้ [2] ได้พัฒนามอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module membrane) จากเมมเบรนไคโตซานเพื่อใช้บำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงสนใจทำมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซาน เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อม ไคโตซานเป็นวัสดุชีวภาพ เมื่อนำมาทำเป็นเมมเบรนจะมีสมบัติชอบน้ำ เนื่องจากมีหมู่เอมีนและไฮดรอกซิลที่ชอบน้ำ จึงมีสมมติฐานว่าการเลือกใช้เมมเบรนชอบน้ำและ/หรือการเลือกใช้กระบวนการเมมเบรนที่เหมาะสมจะสามารถบำบัดน้ำเสียสีย้อมได้

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ที่สำคัญมี 3 ขั้นตอน คือ [3]

1. การเตรียมผ้า (Preparation) เป็นขั้นตอนเตรียมเส้นด้ายหรือผ้าให้มีสภาพที่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ เช่น การเผาขน (Singeing) การลอกแป้ง (Desizing) การขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring) การฟอกขาว (Bleaching) การซูปมัน (Mercerization)

2. การย้อมสี (Dyeing) เป็นการใช่วิธีที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่ย้อม

3. การตกแต่งสำเร็จ (Textile finishing) เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อการปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มเติมสมบัติหรือคุณลักษณะบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์

โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเกิดขึ้นได้จาก 3 กระบวนการ คือ น้ำฟอกขาวมีปริมาณประมาณ 30-35% น้ำย้อม(สี)มีปริมาณประมาณ 10-15% และน้ำล้างมีปริมาณประมาณ 50-60% [3] สารมลพิษและสีในน้ำเสียบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแวลต์ สีดิสเพอร์ส เป็นต้น ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสี นอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้ว ยังลดอัตราการละลายของออกซิเจนเข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำและบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ และเป็นที่น่ารำคาญว่าสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถมองเห็นได้ชัดเจน และทำความรำคาญให้ผู้ใช้แหล่งน้ำ สีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด และแต่ละชนิดยากต่อการย่อยสลายโดยธรรมชาติ

เนื่องจากสีย้อมละลายในน้ำ ในการใช้กระบวนการเมมเบรนแยกองค์ประกอบสีย้อมออกจากน้ำ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์แควพอเรชัน ซึ่งมีหลักการทำให้น้ำเปลี่ยนเฟสเป็นไอด้วยปั๊มสุญญากาศ แยกตัวออกจากองค์ประกอบสีแพร่ผ่านเมมเบรนไคโตซาน ขอบน้ำเป็นเพอร์มิเอต ขณะที่องค์ประกอบสีไม่กลายเป็นไอ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการม้วนเมมเบรนไคโตซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสยสีย้อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ใช้เมมเบรนไคโตซานเชิงพาณิชย์จากบริษัท เอส.เอส. เมมเบรน จำกัด
- 2) ใช้น้ำเสยรวมที่ออกจากกระบวนการผลิตของบริษัท แปซิฟิคการทอ จำกัด
- 3) ใช้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสยสีย้อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้มอดูลเมมเบรนไคโตซานแบบม้วนเป็นเกลียวและกระบวนการเพื่อใช้บำบัดน้ำเสยสีย้อม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อมและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ประเภทของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม แบ่งออกเป็นหลายประเภทดังต่อไปนี้ [4]

- 1) สีย้อมเรอิกซ์ คือ สีย้อมที่เป็นสารประกอบอะโซ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคทำให้สามารถละลายน้ำได้ และมีประจุเป็นลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส
- 2) สีย้อมซิด คือ สีย้อมที่มาจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพรตีน
- 3) สีย้อมเบสิก คือ สีย้อมที่มาจากเกลือของเบสอินทรีย์ ให้ประจุเป็นลบ สามารถละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโพรตีน ไนลอนและอะคริลิก
- 4) สีย้อมแอ็กทีฟ คือ สีย้อมที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ มีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมประเภทนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ สีย้อมแอ็กทีฟแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีย้อมแอ็กทีฟในทุก ๆ สภาวะ
- 5) สีย้อมเพอร์ส เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีสมบัติกระจายตัวได้ดี ใช้ย้อมเส้นใยประเภทแอซิเตด เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี สีย้อมเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สีย้อมอะโซ และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน
- 6) สีย้อมแวต คือ สีย้อมที่มีส่วนประกอบทางเคมีอยู่ 2 แบบ คือ สีย้อมอินดิโก และสีย้อมแอนทราควิโนน สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ
- 7) สีย้อมโซอิก คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส แอซิเตด เป็นต้น
- 8) สีย้อมซัลเฟอร์ เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ หากจะทำการย้อมต้องทำการรีดิวซ์สีย้อมเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ นิยมนำมาย้อมฝ้าย เนื่องจากติดทน และราคาถูก
- 9) สีย้อมแดนท์ เป็นสีย้อมที่ต้องเติมสารช่วยให้สีย้อมติดบนเส้นใย เช่น พวกริโธรมีน ดีบุก เหล็ก เป็นต้น ส่วนใหญ่ใช้ย้อมเส้นใยโพรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์
- 10) สีย้อมอินทริน เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ จะเกิดเป็นคอลลอยด์ขึ้นหลังจากทำปฏิกิริยากับน้ำ ใช้ย้อมฝ้ายจะทำให้ได้สีติดทน มีราคาถูก
- 11) สีย้อมออกซิเดชัน เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ สีย้อมชนิดนี้จะติดแน่น ใช้ย้อมฝ้ายและขนสัตว์

ประเทศไทยมีวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มาจากแหล่งอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นในขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบก่อนการทอและขั้นตอนฟอกย้อม โดยเฉพาะน้ำเสียจากขั้นตอนการฟอกย้อมจะมีสีและกลิ่นที่น่ารังเกียจ และก่อให้เกิดภาวะมลพิษ เนื่องจากสีย้อมบางชนิดมีผลต่อสัตว์น้ำ และระบบนิเวศน์วิทยาทั้งทางตรงและทางอ้อม

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ เป็นดังนี้ [1]

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง จากกระบวนการย้อมและตกแต่ง และสารทำความสะอาดต่าง ๆ ที่เป็นฟอง
2. ค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างสูง
3. ความเข้มข้นของสีสูง
4. อุณหภูมิสูง
5. มีปริมาณของแข็งแขวนลอย
6. มีปริมาณของแข็งละลายน้ำ เช่น พวกเกลือต่าง ๆ สูง
7. มีโลหะหนัก เช่น ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม เป็นต้น

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม มี 2 ประเภทคือ การบำบัดน้ำเสียทางเคมี และการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ตามลำดับ แต่กระบวนการบำบัดเหล่านี้ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียสีย้อมได้มากนัก ดังนั้นจึงหันมาเลือกใช้เทคโนโลยีทางเลือก เช่น เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน

2.2 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน

เมมเบรนเป็นตัวกลางที่เลือกให้สารบางชนิดผ่านไปได้ มีความหนาน้อยกว่าความกว้าง และความยาวมาก ๆ ส่วนของสารที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่าเพอร์มิเอต (Permeate) ส่วนที่เหลือของสารป้อนที่ไม่สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่ารีเทนเตต (Retentate) แรงขับเคลื่อน (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลผ่านเมมเบรนมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ความเข้มข้น ความดัน แรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้แบ่งเป็นกระบวนการเมมเบรนแบบต่าง ๆ

เมื่อเมมเบรนสัมผัสกับน้ำจะแสดงลักษณะสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ขึ้น วิธีการวิเคราะห์ที่มักเลือกใช้คือ การวัดมุมสัมผัส (Contact angle) โดยเมมเบรนที่มีความชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างผิวเมมเบรนกับหยดน้ำ 0 – 90 องศา ส่วนเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำจะมีมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา

เมมเบรนมีลักษณะโครงสร้างในแนวภาคตัดขวางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric structure) และโครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric structure) โดยเมมเบรนแบบสมมาตรเป็นเมมเบรนที่มีลักษณะเหมือนกันตลอดความหนา แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. เมมเบรนแบบมีรูพรุน (Porous membrane) เมมเบรนชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเท่ากันตลอดความหนา ทำให้สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนออกได้ และยอมให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนผ่านเมมเบรนไปได้

2. เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (Dense membrane) เมมเบรนชนิดนี้จะมีความหนาแน่นของเนื้อเมมเบรนมาก และมีรูพรุนขนาดเล็กมากในระดับอังสตรอมทำให้ไม่เห็นรูพรุนเมื่อส่องดูด้วยเครื่อง Scanning electron microscope มีข้อเสียคือให้ค่าฟลักซ์ต่ำแต่ให้ประสิทธิภาพการแยกสูง

เมมเบรนแบบไม่สมมาตร มีโครงสร้างขนาดรูพรุนไม่เท่ากัน โดยผิวหน้าด้านหนึ่งเป็นชั้นเนื้อแน่นหรือมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าผิวหน้าอีกด้าน การแยกจะเกิดที่ชั้นนี้เรียกว่าชั้นการแยก (Selective layer) ส่วนชั้นรูพรุนขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้ชั้นการแยก เรียกว่าชั้นรองรับ (Supporting layer) เมมเบรนแบบไม่สมมาตรจะให้ค่าฟลักซ์สูง เนื่องจากมีความหนาของชั้นการแยกน้อยมาก แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Loeb Sourirajan asymmetric membrane เป็นเมมเบรนแบบไม่สมมาตรที่เตรียมจากพอลิเมอร์ชนิดเดียว และ Composite asymmetric membrane เป็นเมมเบรนที่ชั้นการแยกและชั้นรองรับเตรียมจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

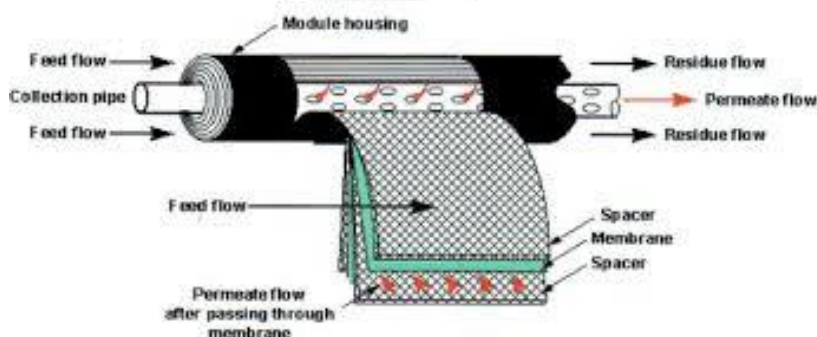
กระบวนการเมมเบรนสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนี้ [5]

1. กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เมมเบรนของกระบวนการนี้มีขนาดรูพรุนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.1 – 10 ไมโครเมตร ใช้แยกสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น สารแขวนลอย และอนุภาคขนาดเล็ก โดยความดันที่ใช้ในการแยกสารมีค่าน้อยกว่า 2 บาร์
2. กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เมมเบรนของกระบวนการนี้มีรูพรุนขนาดเล็กขนาดประมาณ 10 อังสตรอม ถึง 0.1 ไมโครเมตร หรือเป็นเมมเบรนแบบไม่สมมาตรมีความหนาของชั้นการแยก ประมาณ 0.1 – 2 ไมโครเมตร ใช้แยกคอลลอยด์ โดยความดันที่ใช้ในการแยกอยู่ในช่วง 1 – 10 บาร์
3. กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากโมเลกุลขนาดเล็ก มักใช้แยกไอออนเกลือที่มีวาเลนซ์เท่ากับหนึ่ง มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 ดอลตัน จึงต้องใช้ความดันสูงมากกว่าความดันออสโมซิส (Osmotic pressure) ของสารละลายจึงจะได้น้ำบริสุทธิ์แพร่ผ่านเมมเบรนออกมาได้ ความดันที่ใช้ในกระบวนการนี้มีค่าสูงถึง 15 – 150 บาร์
4. กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) กระบวนการนี้แตกแขนงมาจากกระบวนการออสโมซิสผันกลับ โดยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจะใช้แยกไอออนที่มีวาเลนซ์มากกว่าหนึ่งออกจากโมเลกุลน้ำ
5. กระบวนการอิเล็กโทรไดอะลิซิส (Electro dialysis, ED) เป็นกระบวนการแยกที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน ใช้เมมเบรนประเภทเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุบวก และเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุลบต่ออนุกรมกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเพื่อแยกไอออนเกลือออกจากโมเลกุลน้ำ

6. กระบวนการเพอร์แวกอเรชัน (Pervaporation, PV) เป็นกระบวนการแยกของเหลวผสม มีการเปลี่ยนเฟสของของเหลวป้อนกลายเป็นไอทางด้านขาออกของเมมเบรน (Downstream) โดยมักใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เป็นอุปกรณ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสดังกล่าว

ก่อนที่จะนำเมมเบรนมาใช้งาน ต้องนำเมมเบรนมาติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ที่เรียกว่ามอดูล (Module) ซึ่งมีหลายแบบ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame), แบบท่อ (Tubular), แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) และแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound) แต่ละแบบมีราคา, ความหนาแน่นการบรรจุ (Packing density), การสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy consumption) โดยที่สำคัญคือการเกิดโพลาไรเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization) และการเกิดฟาวลิง (Membrane fouling) แตกต่างกัน

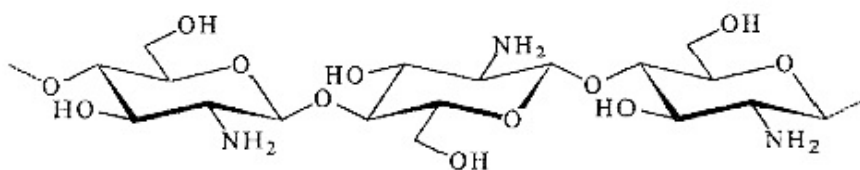
งานวิจัยนี้เลือกศึกษารูปแบบมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1 ในการบำบัดน้ำเสียเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากมอดูลประเภทนี้มีการใช้มากในประเทศไทยด้วยการนำเข้ามาจากต่างประเทศทั้งหมดเพราะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และเป็นรูปแบบที่สามารถพัฒนาขึ้นเองได้ง่าย



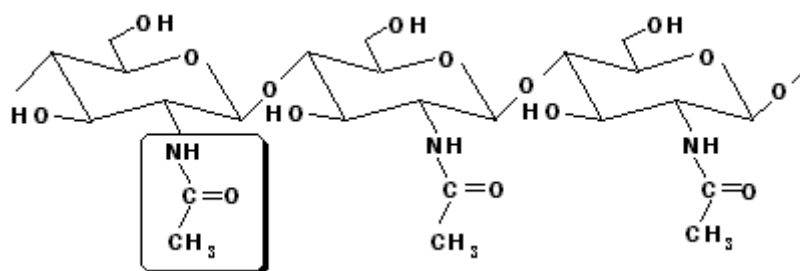
รูปที่ 1 ลักษณะของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเชิงพาณิชย์ [6]

2.3 เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane)

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2 เตรียมได้จากการกำจัดหมู่แอสซิทิลของไคตินออกตั้งแต่ 50% ขึ้นไปมีชื่อทางเคมีว่า poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย N-acetyl-D-glucosamine มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ พบมากในสัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู หรือในแมลงเปลือกแข็ง เป็นต้น จึงไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [7]



รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [8]

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ellouze และคณะ (2012) [9] ศึกษาสมรรถนะการใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นกระบวนการบำบัดขั้นหลังหลังจากการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการ Coagulation-Flocculation (CF) พบว่าได้เพอร์มิเอตฟลักซ์เท่ากับ 24 ลิตร/ชม.-ตร.ม. ณ สภาพการทำงานที่ Volume Retention Factor (VRF) เท่ากับ 3 ความดัน 10 บาร์ และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสสามารถกำจัด COD ได้ 57% กำจัดสีได้ 100% และกำจัดความเค็ม (Salinity) ได้ 30% และพบว่าการใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันแทนกระบวนการ CF ทำให้ได้ผลการกำจัด COD และความเค็มเพิ่มขึ้น

Bhattacharya และคณะ (2010) [10] ศึกษาการใช้เมมเบรนเซรามิกระดับไมโครฟิลเตรชันที่เตรียมจากวัสดุ α -alumina และ clay ในรูปแบบของมอดูลแบบท่อหลายช่อง (Tubular multichannel configuration) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางของช่อง 4 มม. และ 19 มม. ยาว 200 มม. และมีพื้นที่การกรอง 0.045 ตร.ม. ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีซัลเฟอร์ของโรงงานสิ่งทอแห่งหนึ่งที่มีค่าความขุ่นเท่ากับ 5912 NTU และค่า COD เท่ากับ 3910 มก./ล. พบว่าการใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันเซรามิกนี้บำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีด้วยวัสดุดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ที่เตรียมจากผักตบชวาหรือด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต สามารถกำจัดสีได้มากกว่า 99% และ COD ได้ถึง 80% นอกจากนั้นการให้มี

ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นทางเคมียังช่วยลดปัญหาการเกิด Concentration polarization ทำให้ได้ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์คงที่ตลอดการทดสอบนาน 2 ชม.

Sairam และคณะ (2010) [11] รายงานการเตรียมเมมเบรนผิวนาโนฟิลเตรชันของพอลิอะนิลีน (PANI) ไม่สมมาตรบนผ้าไม่ถักไม่ทอ (Non woven backing) ด้วยวิธีเฟสอินเวอร์ชันเพื่อนำมาเตรียมมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module) 3 แบบ (M1, M2 และ M3) เมมเบรนพอลิอะนิลีนในมอดูล M1 และ M2 ได้รับการเชื่อมขวางทางเคมีในระดับต่างกันด้วยสารละลายกลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) แต่ cast บนผ้าไม่ถักไม่ทอทำด้วยพอลิฟอสฟีนเหมือนกัน มอดูล M3 ได้จากการ cast สารละลายพอลิอะนิลีนบนผ้าไม่ถักไม่ทอทำด้วยพอลิเอสเทอร์แล้วเชื่อมขวางด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มอดูลที่ม้วนเสร็จแล้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 นิ้ว ทดสอบความสามารถในการกรองของมอดูลทั้งสามกับตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ อะซิโตน เททราไฮโดรฟูแรน และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พบว่าเมมเบรนพอลิอะนิลีนที่เตรียมได้มีค่า Molecular weight cutoff (น้ำหนักโมเลกุลของสารทดสอบที่ถูกเมมเบรนกักกัน 90-95%) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระหว่าง 150-300 กรัม/โมล มอดูลมีเสถียรภาพในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงจนถึง 65 องศาเซลเซียส แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ นอกจากนี้พบว่ามอดูลทั้ง 3 แบบ ยังคงมีความสามารถในการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันถึงแม้มอดูลจะถูกทำให้แห้ง จึงไม่จำเป็นต้องมีการรักษาสภาพมอดูลในสารรักษาสภาพ (Conditioning or preservative agents)

Zielinska และคณะ (2010) [12] เตรียมเมมเบรนโคโตซาน 2 ชนิด คือ ชนิดไม่เชื่อมขวางกับชนิดที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) พบว่าการเชื่อมขวางด้วยกลูตาราลดีไฮด์ไม่มีผลต่อ Surface morphology และ Thermal stability เมมเบรนทั้งสองชนิดแสดงสมบัติชอบน้ำเมื่อสัมผัสกับของผสมของน้ำกับแอลกอฮอล์ (เมทานอล เอทานอล และ 2-โพรพานอล) การทดสอบในกระบวนการเพอร์แควพอร์ชัน ให้ผลว่าเมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวางให้เพอร์มิเอตฟลักซ์สูงกว่า แต่ค่าการเลือกผ่าน (Selectivity) ต่ำกว่า

Boricha และคณะ (2010) [13] เตรียมเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันของ N,O carboxymethyl chitosan (NOCC) ผสมกับเซลลูโลสแอซิเตต (CA) ค่า Molecular weight cutoff (MWCO) ของเมมเบรนเท่ากับ 710 ดอลตัน ทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนด้วยการนำมาใช้แยกไอออนโครเมียมและไอออนคอปเปอร์จากน้ำเสีย พบว่าให้ค่าการแยกไอออนโครเมียมและไอออนคอปเปอร์สูงสุดเท่ากับ 83.40% และ 72.60% ตามลำดับ ที่สภาวะความดัน 1 เมกะปาสกาล และอัตราการป้อนน้ำเสียเท่ากับ 16 ลิตรต่อนาที

Chen และคณะ (2015) [14] ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชาผงสำเร็จรูปซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ Coagulation-Flocculation (CF) ที่ pH เท่ากับ 5 อุณหภูมิ 20 องศา

เซลเซียส ใช้สารสร้างตะกอน (Coagulating agent) พอลิอลูมิเนียมเฟอริกคลอไรด์ปริมาณ 800 มก./ล. และสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid) พอลิอะคริลาไมด์ปริมาณ 20 มก./ล. เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ตามด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งใช้เมมเบรนเซรามิก ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและ COD ได้ 99.8% และ 77.3% ตามลำดับ สารอินทรีย์ชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเสียต้องบำบัดต่อด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น, COD และ TOC สูงกว่า 99.9% และไม่ตรวจพบว่ามีของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) อยู่ในเพอร์มิเอต การใช้กระบวนการ CF เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนหน้ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันทำให้ได้เพอร์มิเอตพลั๊กซ์จากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสูงมากกว่าการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพียงอย่างเดียวถึง 3 เท่า

Buscio และคณะ (2015) [15] ศึกษาการใช้หน่วย Homogenization-decantation ร่วมกับมอดูลแบบเส้นใยกลวงอัลตราฟิลเตรชันเชิงพาณิชย์ 2 ชนิด UOF-1b และ UOF-4 ของเมมเบรนพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) จากบริษัท Motimo Membrane Technology ประเทศจีน บำบัดน้ำเสียดำเนินการจากโรงงาน กรณีศึกษาเพื่อการนำน้ำเพอร์มิเอตกลับไปใช้ใหม่ พบว่าการใช้หน่วย Homogenization-decantation ซึ่งเป็น ถังมีความจุ 200 ลบ.ม. ให้มีระยะเวลาอยู่ในถัง 2.5 วัน และมีหน่วยทำให้ใส (Cylindro-conical clarifier) ปริมาตร 18 ลบ.ม. ต่อท้าย สามารถกำจัดสีและ COD ได้ 17% และ 10% ตามลำดับ เมื่อถูกบำบัดต่อด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สามารถกำจัด COD และสีได้ 66% และ 30% ตามลำดับ เมื่อขยายขนาดเป็นระบบกึ่งอุตสาหกรรมยังคงให้ผลเช่นเดิม และเมื่อนำน้ำเพอร์มิเอตกลับไปใช้ในกระบวนการย้อมสีผ้าพบว่าให้คุณภาพสี DECMC(l:c) แตกต่างจากเดิมน้อยกว่า 1.5 ซึ่งเป็นระดับที่ยอมรับได้

Li และคณะ (2014) [16] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียดำเนินการโดยใช้หน่วย Integrated membrane coagulation reactor (IMCR) ซึ่งเป็นปฏิกรณ์ที่รวมหน่วยตกตะกอน (Coagulation) ปริมาตร 8 ลิตร และหน่วยอัลตราฟิลเตรชันปริมาตร 29 ลิตร เข้าไว้ด้วยกัน โดยหน่วยอัลตราฟิลเตรชันเป็นมอดูลแบบเส้นใยกลวงของเมมเบรนพอลิเอทิลีนจากบริษัท Korean KMS Company จำนวน 2 มอดูล มีพื้นที่ผิวทั้งหมด 0.97 ตร.ม. ค่า Molecular weight cutoff ของเมมเบรนเท่ากับ 80 กิโลดอลตัน ใช้พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นสารตกตะกอนในหน่วย IMCR มีการกวนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที หน่วยอัลตราฟิลเตรชันมีจังหวะการกรอง 7 นาที หยุด 3 นาที พบว่าสามารถกำจัดสีได้เกือบสมบูรณ์ และสามารถกำจัด COD ได้ถึง 88% เมื่อใช้ PACl ปริมาณ 1.2 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ pH เท่ากับ 5.5 และให้มีระยะเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นาน 3 ชั่วโมง

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุดิบ

- 1) เมมเบรนไคโตซาน 3 ชนิด ได้แก่ เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง, เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์และมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด
- 2) น้ำเสียที่ย้อมรวมจากทุกระบวนการผลิตของบริษัท แปซิฟิกโรงทอ จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

- 1) Scanning Electron Microscopy: JEOL รุ่น JSM-6480 LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 2) UV-VIS spectrophotometer (UV-VIS): Libra S22 (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 3) Universal Testing: LLOYD Instruments LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 4) Contact angle: Rame-hart 200F1 (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3 การทดสอบสมบัติของเมมเบรน

3.3.1 ความสามารถทนต่อแรงดึง

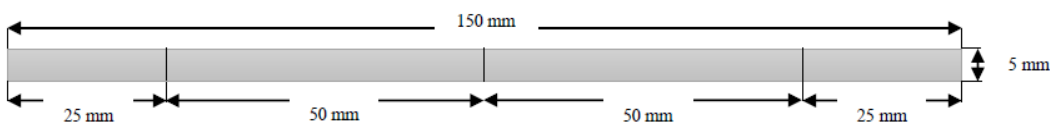
การทดสอบแรงดึงของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น จะใช้ตามมาตรฐาน D882 เนื่องจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบมีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และทำการทดสอบแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมพอสิตตามมาตรฐาน D638 เนื่องจากชิ้นงานมีความหนามากกว่า 14 มิลลิเมตร ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้ทดสอบกับพลาสติกต่างๆ ทั้งที่มีสารเสริมแรงหรือไม่มีสารเสริมแรง ทำการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882

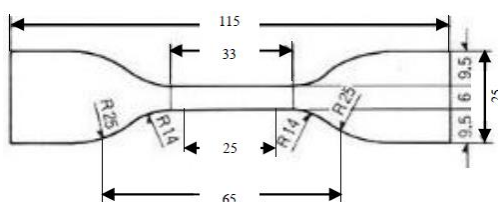
- 1) ตัดเมมเบรนแบบเนื้อแน่นให้มีขนาดเท่ากับ 5×150 ตารางมิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4 ก
- 2) วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
- 3) ทำการทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine แสดงในรูปที่ 5 ที่สภาวะการทดสอบดังนี้
 - ก) ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) เท่ากับ 100 นิวตัน
 - ข) ใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 400 มิลลิเมตรต่อนาที
 - ค) ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

2. การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638

- 1) ตัดเมมเบรนแบบคอมพอสิตให้เป็นรูปรีมเบลมีขนาดดังแสดงในรูปที่ 4 ข
- 2) วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
- 3) ทำการทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine แสดงในรูปที่ 5 ที่สภาวะการทดสอบดังนี้
 - ก) ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) เท่ากับ 100 นิวตัน
 - ข) ใช้ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 400 มิลลิเมตรต่อนาที
 - ค) ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 33 มิลลิเมตรต่อนาที



ก) การเตรียมตัวอย่างเมมเบรนแบบเนื้อแน่น



ข) การเตรียมตัวอย่างเมมเบรนแบบคอมพอสิต

รูปที่ 4 ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างเมมเบรนเพื่อการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Universal testing machine

3.3.2 ความชอบน้ำของเมมเบรน

ศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนจากค่ามุมสัมผัสและค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ โดยวัดค่ามุมสัมผัสแบบ Static Contact Angle ด้วยเครื่อง Rame-hart 200F1 ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์หาได้จากความชันของกราฟพล็อตระหว่างค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่แพร่ผ่านเมมเบรน ณ ค่าความดันต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

- 1) ตัดตัวอย่างเมมเบรนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 38 มิลลิเมตร
- 2) นำมาวางลงบนผิวหน้าแปลนของเซลล์เมมเบรนของชุดทดสอบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ ดังแสดงในรูปที่ 6
- 3) ป้อนน้ำบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปทางด้านขาเข้าของมอดูล
- 4) ควบคุมแรงดันทางด้านสารป้อนให้มีระดับคงที่อยู่ที่ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 5) จับเวลาและวัดปริมาณเพอร์มิเอตน้ำที่ผ่านเมมเบรน ณ สภาวะคงที่ (Steady state) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าฟลักซ์ตามสมการที่ 1
- 6) เปลี่ยนเมมเบรนแผ่นใหม่ ดำเนินซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 – 5 โดยเปลี่ยนความดันขาเข้าเป็น 100, 150, 200, 250 และ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ
- 7) พล็อตกราฟระหว่างค่าฟลักซ์น้ำกับค่าความดันทดลอง

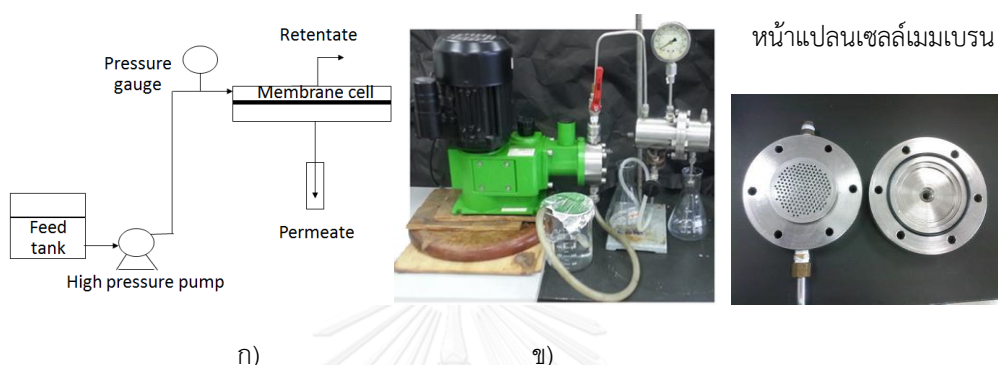
$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ J คือ ค่าฟลักซ์ (ลบ.ชม. ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

Q คือ ปริมาณเพอร์มิเอตผ่านเมมเบรน ณ สภาวะคงที่ (ลบ.ชม.)

A คือ พื้นที่ของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ตารางเมตร)

Δt คือ เวลาที่ใช้ในการเก็บเพอร์มิเอต (ชั่วโมง)



รูปที่ 6 ชุดทดสอบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ ก) แผนผังชุดการทดลอง ข) รูปถ่ายชุดการทดลอง

3.3.3 การศึกษาค่า Molecular weight cutoff (MWCO) ของเมมเบรน

Molecular weight cutoff (MWCO) เป็นเทอมที่ใช้อธิบายขนาดรูพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนในเมมเบรน หมายถึงขนาดน้ำหนักโมเลกุลในหน่วยดอลตันของโมเลกุลตัวถูกละลายที่เล็กที่สุดซึ่งถูกกักกันโดยเมมเบรนได้ร้อยละ 90 [17] โมเลกุลตัวถูกละลายที่มักนำมาทดสอบหาค่า MWCO ได้แก่ เด็กซ์แทรน (Dextran) พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) และ โปรตีน เป็นต้น

โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารพอลิเอทิลีนไกลคอล มีวิธีการศึกษา ดังนี้

- 1) เตรียมสารละลาย PEG ในน้ำให้มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร จากสาร PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล ดังนี้ 350, 550, 1450, 4,000, 6,000, 10,000 และ 35,000 ดอลตัน ตามลำดับ
- 2) วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย PEG ในเทอมของค่า Chemical oxygen demand (COD)
- 3) เตรียมเมมเบรนและมอดูลเมมเบรนเช่นเดียวกับการศึกษาค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ในหัวข้อ 3.3.2 แต่เปลี่ยนสารป้อนเป็นสารละลาย PEG
- 4) ควบคุมแรงดันทางด้านขาเข้าให้คงที่ที่ 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 5) เก็บตัวอย่างเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน ณ สภาวะคงที่ (Steady state) นำมาวิเคราะห์ค่า COD

- 6) คำนวณหาค่าร้อยละการกักกันสาร ตามสมการที่ 2
- 7) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 กับสารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุลอื่น ๆ ตามที่ระบุใน 1) จนครบ
- 8) พล็อตกราฟระหว่างค่าร้อยละการกักกันสารกับค่าน้ำหนักโมเลกุล

$$\%R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ C_p = ค่า COD ของเพอร์มิเอต (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_f = ค่า COD ของสารป้อน (มิลลิกรัม/ลิตร)

3.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

คุณลักษณะโครงสร้างตามแนวความหนาของเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4 การเตรียม Calibration curve หาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-VIS Spectrophotometer

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียรวมจากโรงงานที่มีการใช้สีย้อมรีแอคทีฟชนิดสีเหลือง สีน้ำเงิน และสีแดง เป็นส่วนใหญ่ในกระบวนการย้อมผ้า จึงเตรียม Calibration curve สำหรับการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสีย้อม ดังนี้

- 1) ผสมผงสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีแดง อย่างละเท่า ๆ กัน หนัก 1 กรัม ละลายผงสีผสมด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 2) เจือจางสารละลายสีความเข้มข้นเท่ากับ 1 ก./ล. ที่เตรียมจากข้อที่ 1) ให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้ 0.1, 0.08, 0.06, 0.04, 0.02, 0.01 และ 0.005 ก./ล.
- 3) วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbent) ที่ทุกความเข้มข้นในข้อ 2) ที่ความยาวคลื่น 420, 475, 500, 535, 560, 600 และ 640 นาโนเมตร ตามลำดับ เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุด โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้นที่แต่ละความยาวคลื่น ความยาวคลื่นที่ให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรงมากที่สุด จะเป็นความยาวคลื่นที่จะนำไปใช้ในการวัดความเข้มข้นสีของน้ำเสียในการประเมินประสิทธิภาพของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวของเมมเบรนไคโตซานต่อไป

3.5 วิธีการทำมอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของรูปแบบการม้วนเมมเบรนไคโตซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module) โดยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวได้จากการม้วนเมมเบรนรอบแกนกลางของมอดูล ซึ่งงานวิจัยทำจากท่อพีวีซีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1.7 ซม. และมีการเจาะรูเล็ก ๆ รอบท่อแกนกลาง เพื่อให้น้ำเพอร์มิเอตที่แพร่ผ่านเมมเบรนออกจากมอดูลไปท่อแกนกลางที่ม้วนเมมเบรนแล้วจะถูกประกอบเข้าไปในปลอกของมอดูลซึ่งงานวิจัยนี้ทำจากท่อพีวีซีดังรูปที่ 7 ได้เป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวของส่วนเซลล์เมมเบรนของชุดการศึกษา



รูปที่ 7 มอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว

3.6 วิธีการดำเนินการศึกษา

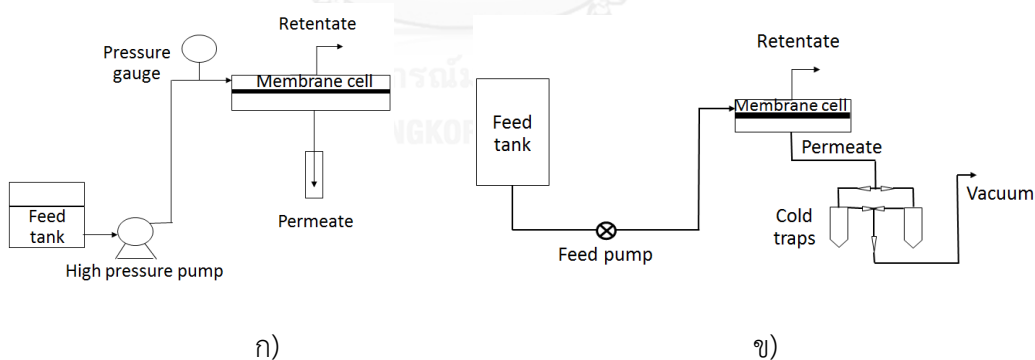
- 1) ศึกษาลักษณะของเมมเบรนไคโตซาน 3 แบบ ได้แก่ แบบเนื้อแน่นทั้งชนิดไม่มีการเชื่อมขวาง และมีการเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์ชนิดมีการเชื่อมขวาง ดังนี้
 - ก. วิเคราะห์ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (Pure water permeability) ด้วยมอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate & frame module)
 - ข. วิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)
 - ค. วิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)
 - ง. ศึกษาค่า Molecular weight cutoff
 - จ. ศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วย Scanning electron microscope (SEM)
- 2) ศึกษาลักษณะของน้ำเสียสีย้อม เป็นพารามิเตอร์ในการประเมินประสิทธิภาพ ได้แก่
 - ก. พีเอช
 - ข. ปริมาณของแข็งทั้งหมด
 - ค. COD
 - ง. ความเข้มข้นสี ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
- 3) ศึกษาผลของรูปแบบการม้วนเมมเบรนไคโตซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

3.1 การศึกษาผลของความยาวของเมมเบรน

- ก. ม้วนเมมเบรนไคโตซาน 3 แบบ ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. (ทีละชนิดและทีละขนาด) รอบแกนกลางเจาะรู
- ข. หาค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลโดยใช้ปั๊มความดันสูงสร้างแรงขับเคลื่อน (Driving force) ตามแผนผังชุดการทดลองดังรูปที่ 8 ก
- ค. หาค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมของมอดูลโดยใช้ปั๊มสุญญากาศสร้างแรงขับเคลื่อน ตามแผนผังชุดการทดลองดังรูปที่ 8 ข

3.2 การศึกษาผลของการใช้สเปเซอร์ (Spacer)

- ก. ใช้ผ้าสปันบอนด์ และตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกเป็นสเปเซอร์ที่มีความยาว 3 ขนาด คือ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม.
 - ข. แทรกสเปเซอร์บริเวณกลางแผ่นเมมเบรน 2 แบบ คือแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางความยาว 90 ซม. แล้วม้วนเมมเบรนและสเปเซอร์รอบแกนกลางเจาะรูเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมีสเปเซอร์
 - ค. หาค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลโดยใช้ปั๊มความดันสูงสร้างแรงขับเคลื่อน
 - ง. หาค่าฟลักซ์ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลโดยใช้ปั๊มสุญญากาศสร้างแรงขับเคลื่อน
- 4) ศึกษาอายุการใช้งานของมอดูลที่มีสมรรถนะการบำบัดน้ำเสียดีที่สุดโดยใช้ปั๊มสุญญากาศสร้างแรงขับเคลื่อน



รูปที่ 8 แผนภาพชุดการทดลอง ก) ใช้ปั๊มความดันสูงสร้างแรงขับเคลื่อน
ข) ใช้ปั๊มสุญญากาศสร้างแรงขับเคลื่อน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของเมมเบรน

ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 3 ชนิด คือ แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง แสดงดังรูปที่ 9 โดยแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางมีผิวหยาบกว่าแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง จากคำบอกเล่าของผู้ผลิตแผ่นเมมเบรนไคโตซานว่า เมื่อนำแผ่นเมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เป็นระยะเวลาหนึ่ง ล้างน้ำและตากแห้งจะได้แผ่นเมมเบรนที่มีความหนามากขึ้นเล็กน้อย เหนียวขึ้น แผ่นมีสีเหลืองนวลมากขึ้น ต่างจากแผ่นแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางตั้งต้นที่มีสีเหลืองซีด ดังนั้น ความหนาขึ้นของแผ่นเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางเกิดจากผลการเชื่อมขวางของหมู่ซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกที่หมู่เอมีนของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 10 เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในแนวภาคตัดขวาง (ด้านความหนา) ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าโครงสร้างของแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางมีการอัดตัวกันแน่นกว่าแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง ไม่เห็นรูพรุนในเมมเบรนแบบเนื้อแน่นทั้ง 2 ชนิด จากกำลังความสามารถของเครื่อง SEM สำหรับเมมเบรนแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง พบเนื้อเมมเบรนไคโตซานบาง ๆ เคลือบอยู่บนผิวของผ้าสปันปอนด์ที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ (Support) และสอดแทรกไประหว่างเส้นใยของผ้าสปันปอนด์จนถึงผิวด้านล่างของผ้ารวมเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เห็นรูพรุนในส่วนเนื้อไคโตซานของเมมเบรนแบบคอมพอสิตเช่นกัน



(ก)

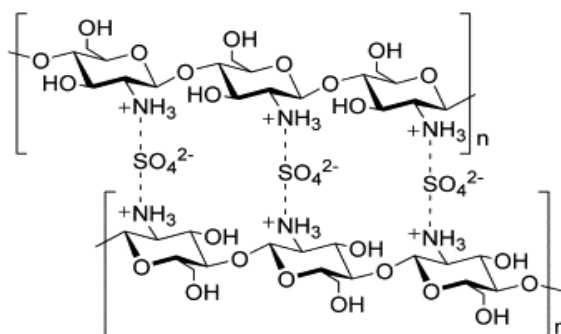
(ข)

(ค)

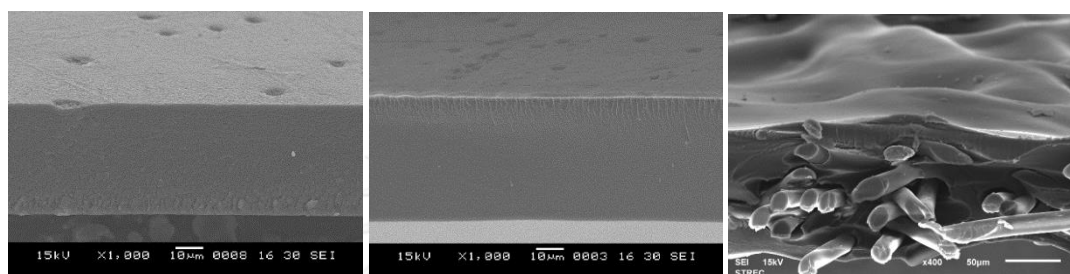
รูปที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน

(ก) แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง (ข) แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง

(ค) แบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง



รูปที่ 10 โครงสร้างเชื่อมขวางไอออนิกของไคโตซานด้วยกรดซัลฟิวริก [18]



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 11 ภาคตัดขวางของเมมเบรนไคโตซาน 3 แบบ

(ก) เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ข) เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ค) เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง กำลังขยาย 400 เท่า

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเมมเบรนไคโตซาน

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบสมบัติค่าแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 (มาตรฐานการทดสอบค่าแรงดึงสำหรับแผ่นฟิล์มที่มีความหนาไม่เกิน 1 มม. หรืออาจใช้กับแผ่นฟิล์มที่มีความหนาไม่เกิน 0.25 มม. [19]) ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางและแบบมีการเชื่อมขวางซึ่งมีความหนาเท่ากับ 30.3 ± 0.8 และ 40.8 ± 0.9 ไมโครเมตร ตามลำดับ พบว่ามีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 65.7 ± 3.5 และ 71.3 ± 3.4 เมกะปาสคาล ร้อยละการยืดเท่ากับ 12.6 ± 1.5 และ 9.8 ± 0.9 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลทางลักษณะทางกายภาพที่พบว่าเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางมีความหนามากกว่าและเหนียวกว่าแบบไม่เชื่อมขวาง

ตารางที่ 1 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น

ชนิดเมมเบรนแบบเนื้อแน่น	ความหนา (μm)	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)	% การยืด
ไม่เชื่อมขวาง	30.3 ± 0.8	65.7 ± 3.5	12.6 ± 1.5
เชื่อมขวาง	40.8 ± 0.9	71.3 ± 3.4	9.8 ± 0.9

ตารางที่ 2 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ของเมมเบรนแบบคอมพอสิต

วัสดุ	ความหนา (μm)	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)	%การยืด
เมมเบรนแบบคอมพอสิต มีการเชื่อมขวาง	141.7 ± 2.3	34.5 ± 1.9	11.4 ± 1.4
วัสดุรองรับผ้าสปันปอนด์	64.0 ± 6.7	17.7 ± 2.8	4.7 ± 1.2

สำหรับค่าความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D638 (มาตรฐานการทดสอบค่าแรงดึงสำหรับแผ่นฟิล์มที่มีความหนาเกิน 1 มม. จนถึง 14 มม. [20]) ดังแสดงในตารางที่ 2 มีความหนา ค่าความสามารถทนต่อแรงดึง และร้อยละการยืดเท่ากับ 141.7 ± 2.3 ไมโครเมตร, 34.5 ± 1.9 เมกะปาสคาล และ 11.4 ± 1.4 ตามลำดับ โดยวัสดุรองรับผ้าสปันปอนด์มีค่าทั้งสามเท่ากับ 64.0 ± 6.7 ไมโครเมตร, 17.7 ± 2.8 เมกะปาสคาล และ 4.7 ± 1.2 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าค่าความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมพอสิตส่วนใหญ่เป็นผลจากผ้าสปันปอนด์ แต่เนื้อเมมเบรนโคโตะซานที่หลอมรวมตัวอยู่กับผ้าสปันปอนด์ ทำให้วัสดุคอมพอสิตที่ได้สามารถยืดได้มากขึ้น มาตรฐาน ASTM D638 เป็นวิธีการทดสอบกับผ้าสปันปอนด์เชิงพาณิชย์หลายชนิด เช่น Braskem PP CP250H (Polypropylene Homopolymer) [21] หรือ Braskem PP CP360H [22] เป็นต้น จึงนำมาใช้ทดสอบหาค่าแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมพอสิตนี้ด้วย

4.1.3 ผลการทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรนโคโตะซาน

งานวิจัยนี้ทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรนในเทอมของค่ามัมสัมผัสและค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (Pure water permeability) ทดสอบค่ามัมสัมผัสโดยใช้เครื่อง Rame-hart 200F1 ได้ค่ามัมสัมผัสของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางเท่ากับ 77.8 ± 1.3 , 92.1 ± 1.1 และ 70.2 ± 1.7 องศา ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเมมเบรนที่มีความชอบน้ำมากกว่าจะให้ค่ามัมสัมผัสต่ำกว่า ดังนั้นลำดับความชอบน้ำของ

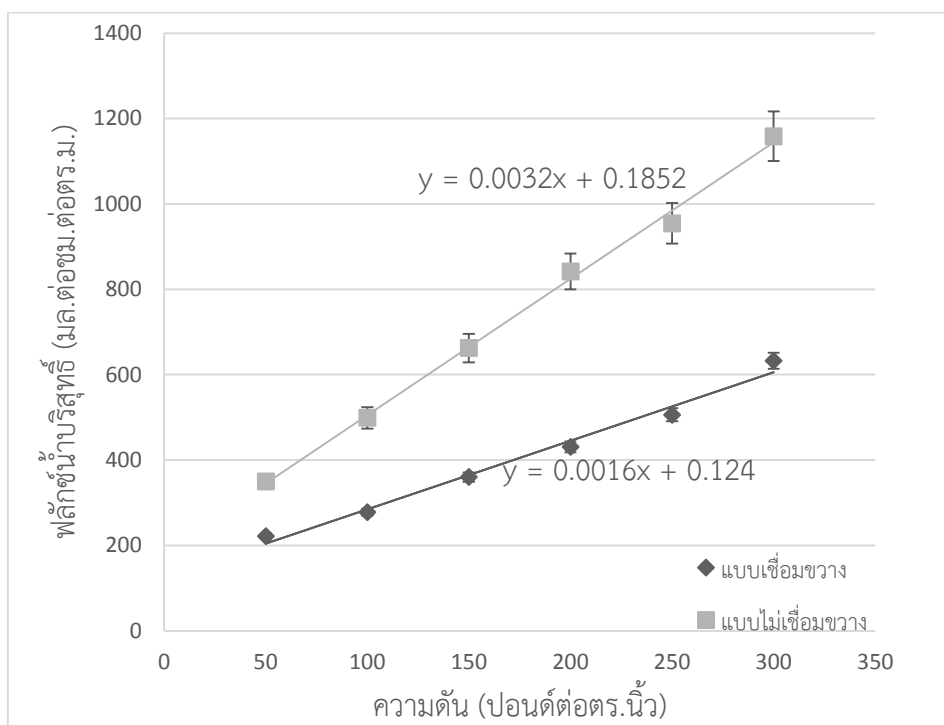
เมมเบรนจากมากไปน้อย คือ แบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง อธิบายได้ว่าหมู่เอมีนซึ่งเป็นหมู่ชอบน้ำในเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางมีจำนวนลดน้อยลงจากการถูกใช้เป็นตัวตำแหน่งของการเชื่อมขวาง ทำให้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางมีความชอบน้ำน้อยลง ค่ามัมสัมผัสดึงสูงขึ้น ผ้าสปันปอนด์เปล่ามีค่ามัมสัมผัสเท่ากับ 69.0 ± 1.6 องศา ดังแสดงในตารางที่ 3 และจากการทดสอบผ้าสปันปอนด์ในมอดูลแบบแผ่นและกรอบให้ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เท่ากับ $1,088.3 \pm 2.7$ ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร โดยไม่ต้องให้แรงขับดัน แสดงว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยของผ้าสปันปอนด์ช่วยให้หยดน้ำซึมผ่านออกไปได้โดยสะดวก อย่างไรก็ตามเนื้อไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางซึ่งหลอมรวมกับเส้นใยของผ้าสปันปอนด์เป็นหน่วยเดียวกันในเมมเบรนแบบคอมพอสิตขวางกันหยดน้ำให้แพร่ผ่านได้ช้าลง เกิดเป็นค่ามัมสัมผัสดึงสูงขึ้น แต่น้อยกว่าค่ามัมสัมผัสของแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง

ตารางที่ 3 ค่ามัมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดของเมมเบรน	ค่ามัมสัมผัส (องศา)	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวหน้าของเมมเบรน
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	77.8 ± 1.3	
แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง	92.1 ± 1.1	
แบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง	70.2 ± 1.7	
ผ้าสปันปอนด์	69.0 ± 1.6	

ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่สภาวะคงที่ (Steady state) ในรูปที่ 12 คือค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ โดยเมมเบรนที่มีความชอบน้ำมากกว่าจะให้ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งได้ผลความชอบน้ำสอดคล้องกับค่ามัมสัมผัส คือแบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง มีค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์เท่ากับ ∞ , 3.2 และ 1.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

แบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวางได้เท่ากับ ∞ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพราะสามารถได้ฟลักซ์น้ำแม้ไม่ได้ให้แรงขับเคลื่อน



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

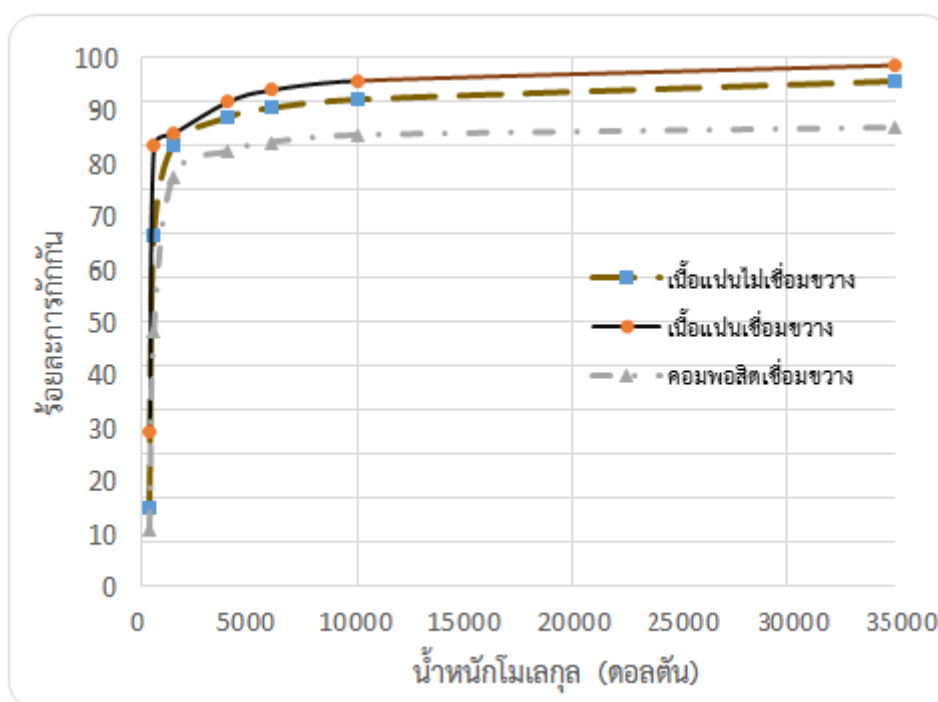
ตารางที่ 4 ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดเมมเบรน	ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ชม./ชม./ตร.ม./ปอนด์ต่อตร.นิ้ว)
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	3.2
แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง	1.6
แบบคอมพอสิตมีการเชื่อมขวาง	∞

4.1.4 ผลการศึกษาค่า Molecular weight cutoff (MWCO) ของเมมเบรน

กราฟ Molecular weight cutoff ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในรูปที่ 13 พบว่าค่า MWCO เมื่อใช้เกณฑ์ค่าการกักกันร้อยละ 90 ของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น

มีการเชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง และแบบคอมพอลิสมีการเชื่อมขวาง เท่ากับ 550, 1,500 และ 6,000 ตามลำดับ แต่เมื่อใช้เกณฑ์ที่เข้มงวดขึ้นที่ร้อยละ 95 ค่า MWCO ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ 4,000, 10,000 และหาไม่ได้ ตามลำดับ เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 200 – 1,000 ดอลตัน [23] ทำให้มอดูลที่เตรียมจากเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางน่าจะ ให้ผลในการแยกสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ดี



รูปที่ 13 กราฟ Molecular weight cutoff ของเมมเบรน 3 ชนิด

4.2 ผลการศึกษาสร้าง Calibration curve สำหรับวัดความเข้มข้นสีของน้ำเสีย

จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbent) กับความเข้มข้นสีผสมในน้ำ ที่ความยาวคลื่น 420, 475, 500, 535, 560, 600 และ 640 นาโนเมตร พบว่าที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 535 นาโนเมตร ให้ความสัมพันธ์ของเส้นตรงใกล้เคียง 1 มากที่สุด (ค่า $R^2 = 0.9545$) จึงเลือกใช้เป็น ความยาวคลื่นในการวัดความเข้มข้นสีในน้ำเสีย

4.3 คุณภาพน้ำเสี้ยว

ตารางที่ 5 เป็นลักษณะของน้ำเสี้ยวจากโรงงานการศึกษาที่สนใจ 4 ตัว คือ พีเอช ของแข็งทั้งหมด ซีโอดี และความเข้มข้นสี เทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง [24] ซึ่งพบว่าซีโอดี มีค่าเกินมาตรฐานฯ มาก ในมาตรฐานฯ จะกำหนดสีไว้เป็นข้อความว่า “ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ” แต่สี ของน้ำเสี้ยวดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 14 เป็นที่พึงรังเกียจมาก สมควรต้องบำบัด ถึงแม้ใน มาตรฐานฯ จะไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐาน ของของแข็งทั้งหมดไว้ แต่กำหนดเป็นค่าทีดีเอส และ สารแขวนลอย (ซึ่งเท่ากับ 3.0 – 5.0 ก./ล. และ 0.050 – 0.150 ก./ล. ตามลำดับ) เนื่องจากผลรวม ของค่าทั้งสองประมาณเท่ากับค่าของของแข็งทั้งหมด โดยไม่คิดส่วนของแข็งจมได้ (Settleable Solids หมายถึงตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ) ซึ่งในน้ำเสี้ยวไม่มี นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณของแข็งในน้ำเสี้ยวดิบส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 97 อยู่ในรูปของค่า ทีดีเอสมากกว่าสารแขวนลอย ถึงแม้ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสี้ยวดิบจะเกินค่ามาตรฐานฯ ค่าสูงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 5 งานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์เป็นค่าของของแข็งทั้งหมด เมื่อเทียบกับ ค่ามาตรฐานทีดีเอส พบว่าในน้ำเสี้ยวดิบมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน สมควรต้องบำบัดเช่นกัน

ตารางที่ 5 คุณภาพของน้ำเสี้ยวดิบ

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่าน้ำเสี้ยวดิบในงานวิจัยนี้	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง [24]
พีเอช	8.47±0.0	5.5 – 9.0
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	6.6±1.0	3.0 – 5.0*
ของแข็งแขวนลอย (ก./ล.)	0.184±0.011	0.050 – 0.150
ซีโอดี (ก./ล.)	4.8±0.2	0.12 – 0.40
สี (ก./ล.)	0.0174±0.0002	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

หมายเหตุ : *ค่ามาตรฐานทีดีเอส



รูปที่ 14 ลักษณะสีของน้ำเสียสีย้อมดิบก่อนการบำบัด

4.4 ผลการศึกษารูปแบบการม้วนเมมเบรนเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวกรณีไม่มี Spacer

4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล

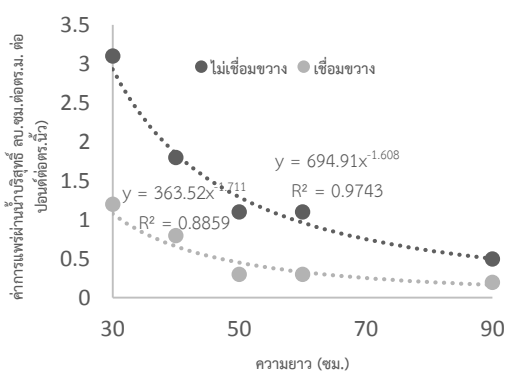
เมื่อนำเมมเบรนแต่ละชนิดมาม้วนรอบท่อแกนกลางเจาะรูเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่มีความยาวต่าง ๆ กัน คือ 30, 60 และ 90 ซม. จะมีค่าสมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแตกต่างจากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1.3 ขึ้นกับรูปแบบการม้วน และเนื่องจากมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวในงานวิจัยนี้ทำจากพลาสติกพีวีซี ซึ่งทนความดันได้ไม่มากเท่ามอดูลแบบแผ่นและกรอบที่ทำจากเหล็กไร้สนิม ในการทดสอบค่าสมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแต่ละชนิด จึงทำในช่วงความดัน 10 – 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่ามอดูลที่เตรียมจากเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางที่มีความยาว 30, 60 และ 90 ซม. มีค่าเท่ากับ 3.1, 1.1 และ 0.5 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ จากแบบมีการเชื่อมขวางมีค่าเท่ากับ 1.2, 0.3 และ 0.2 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ และจากแบบคอมพอสิตมีค่าเท่ากับ 188.3, 12.9 และ 7.9 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 โดยมีลำดับความชอบน้ำของมอดูลเรียงจากมากไปน้อย คือ แบบคอมพอสิต > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง ตามสมบัติค่ามุมสัมผัสประจำตัวของวัสดุเมมเบรนแต่ละชนิดซึ่งไม่ขึ้นกับรูปทรงการนำไปใช้งาน เช่นเดียวกับผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1.3 แต่การเพิ่มจำนวนรอบหรือความยาวเมมเบรนในมอดูลมีผลทำให้ความสามารถในการแพร่ผ่านของน้ำบริสุทธิ์มีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงการจะได้ฟลักซ์น้ำจากการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียลดลง

หากพิจารณาค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.) ของมอดูลแต่ละประเภทกับความยาวเมมเบรนในช่วงความดัน 10 – 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่ามีความสัมพันธ์แบบยกกำลัง (Power) ที่แต่ละค่าแรงดัน หรือเมื่อพิจารณาเป็นค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ของมอดูลแต่ละประเภทกับความยาวเมมเบรน ในช่วงความดัน 10 – 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีความสัมพันธ์แบบยกกำลังเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 15 หรือเมื่อใช้การสร้างสมการถดถอยกำลังสองเพอร์มิเอตเป็นแรงขับเคลื่อนในระบบการแบบเพอร์แพรเชชันที่ -0.7 บาร์ ซึ่งเป็นสถานะที่ใช้ในการดำเนินการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวในงานวิจัยนี้ ก็มีความสัมพันธ์แบบ

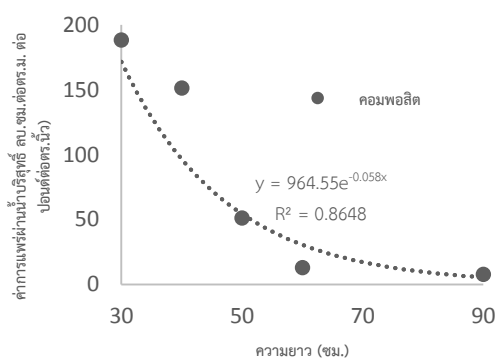
ยกกำลังเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 16 แต่ไม่มีความแตกต่างของฟลักซ์น้ำที่ได้จากมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่น

ตารางที่ 6 สมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ความยาว เมมเบรน (ซม.)	ค่าการแพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตร.นิ้ว)		
	ไม่เชื่อมขวาง	เชื่อมขวาง	คอมพอลสิต
30	3.1	1.2	188.3
60	1.1	0.3	12.9
90	0.5	0.2	7.9

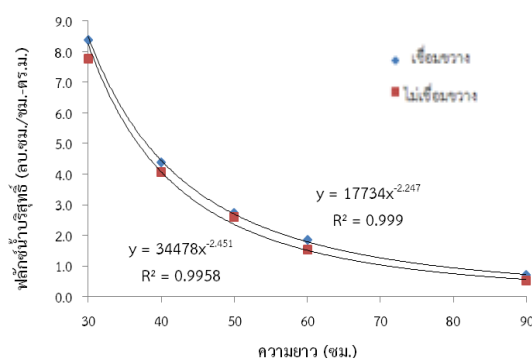


(ก)

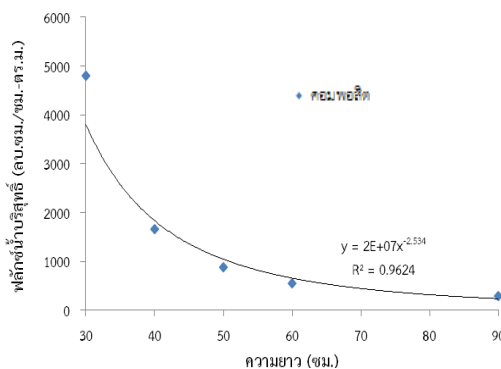


(ข)

รูปที่ 15 ผลของความยาวเมมเบรนต่อสมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลเมื่อใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อน (ก) เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (ข) เมมเบรนแบบคอมพอลสิต



(ก)



(ข)

รูปที่ 16 ผลของความยาวเมมเบรนต่อฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของมอดูล เมื่อใช้สัณฐานภาคเป็นแรงขับเคลื่อน

(ก) เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (ข) เมมเบรนแบบคอมพอสิต

4.4.2 ผลของความยาวเมมเบรนต่อการบำบัดน้ำเสียสีเขียว

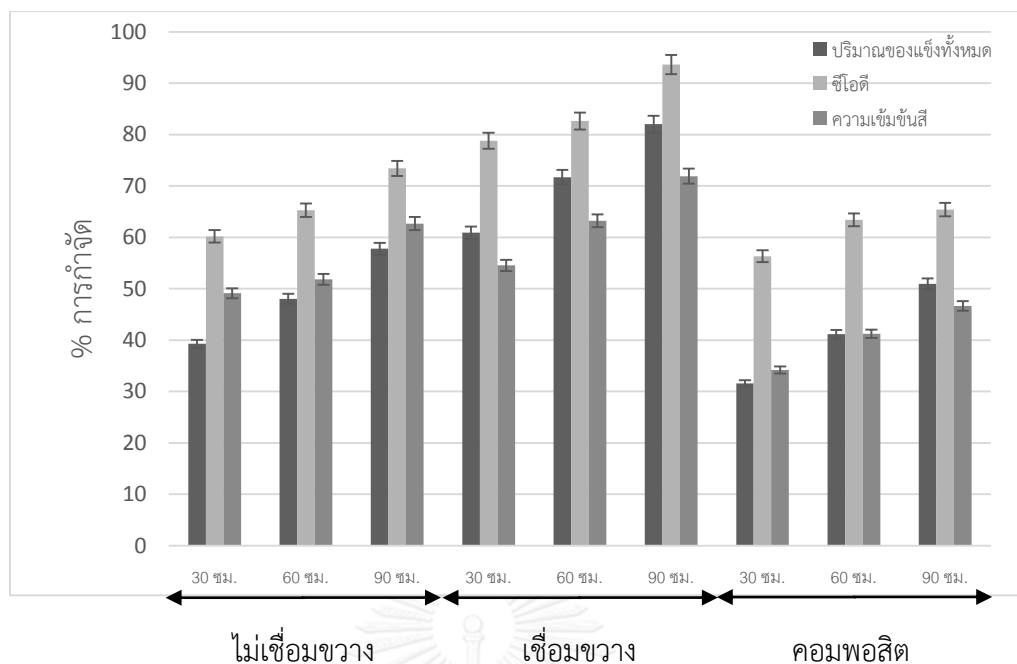
ผลการใช้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวดำเนินตามแบบกระบวนการเพอร์แควพอเรชันที่ -0.7 บาร์ บำบัดน้ำเสียสีเขียว แสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 17 พบว่าได้ฟลักซ์น้ำจากมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางที่ความยาว 30, 60 และ 90 ซม. เท่ากับ 6.8 ± 0.2 , 1.5 ± 0.0 และ 0.5 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. ตามลำดับ จากมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง เท่ากับ 6.3 ± 0.1 , 1.3 ± 0.0 และ 0.4 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. ตามลำดับ และจากมอดูลเมมเบรนแบบคอมพอสิต เท่ากับ $3,980.0 \pm 216.0$, 508.0 ± 17.7 และ 276.4 ± 7.9 ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าได้ฟลักซ์น้อยลงเมื่อความยาวมากขึ้น แม้จากเมมเบรนแบบคอมพอสิตก็ยังสามารถได้ฟลักซ์น้ำน้อยมาก ยกเว้นที่ความยาว 30 ซม. ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องศึกษาเมมเบรนที่ยาวกว่า 90 ซม. อีก อย่างไรก็ตามในกรณีของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่ใช้สำหรับการแยกแก๊สหรือเพอร์แควพอเรชัน โดยปกติจะให้ฟลักซ์น้อยกว่า 1 ลิตรต่อซม.ต่อตร.ม. [25] โดยปกติสำหรับมอดูลใหม่หรือสะอาดจะให้เพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียต่ำกว่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เล็กน้อย เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ Concentration polarization และเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียจะมีค่าลดลงตามลำดับตามอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ยอมรับไม่ได้ก็จะทำการล้างมอดูลซึ่งจะศึกษาในหัวข้อที่ 4.6 ผลการศึกษาในหัวข้อนี้พบว่าคุณภาพน้ำหลังการบำบัดเรียงตามลำดับจากดีที่สุดไปแย่สุดตามชนิดเมมเบรน คือ แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบคอมพอสิต และตามความยาวเมมเบรน คือ 90 ซม. > 60 ซม. > 30 ซม. ทุก ๆ พารามิเตอร์ถึงแม้ลักษณะสีน้ำหลังการบำบัดจากมอดูลแต่ละชนิดแสดงในรูปที่ 18 จะดีกว่าน้ำเสียดิบในรูปที่ 14 มาก แต่ค่าซีโอดียังคงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งยกเว้นมอดูลที่เตรียมจากเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. เท่านั้น ซึ่งมอดูลชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ซีโอดี และสี

เท่ากับร้อยละ 82.0 ± 3.3 , 93.6 ± 2.6 และ 71.9 ± 1.2 ตามลำดับ จึงจะใช้มอดูลประเภทนี้ ศึกษาผล
การใช้ Spacer ในหัวข้อถัดไป

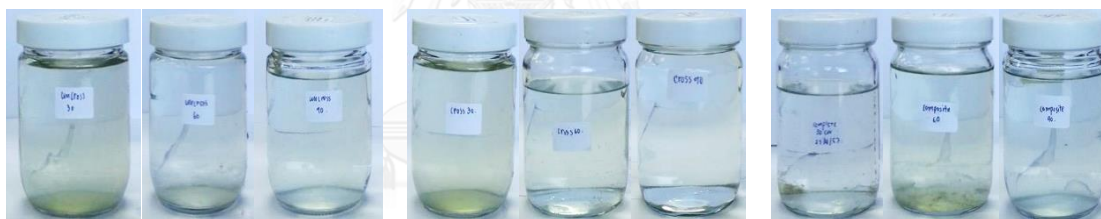
ตารางที่ 7 เพอร์มิเอตฟลักซ์ และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบหมุนเป็นเกลียว

เมมเบรน	ความยาว (ซม.)	เพอร์มิเอตฟลักซ์ (ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.)	คุณภาพน้ำหลังการบำบัด			
			พีเอช	ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	ซีโอดี (ก./ล.)	สี (มก./ล.)
ไม่เชื่อมขวาง	30	6.8 ± 0.2	8.2 ± 0.0	4.0 ± 0.4	1.9 ± 0.3	8.8 ± 0.2
	60	1.5 ± 0.0	8.1 ± 0.0	3.5 ± 0.8	1.7 ± 0.2	8.4 ± 0.1
	90	0.5 ± 0.0	8.0 ± 0.0	2.8 ± 0.6	1.3 ± 0.2	6.5 ± 0.1
เชื่อมขวาง	30	6.3 ± 0.1	8.3 ± 0.0	2.6 ± 0.3	1.0 ± 0.1	7.9 ± 0.1
	60	1.3 ± 0.0	8.3 ± 0.0	1.9 ± 0.3	0.8 ± 0.2	6.4 ± 0.2
	90	0.4 ± 0.0	8.0 ± 0.0	1.2 ± 0.3	0.3 ± 0.1	4.9 ± 0.2
คอมพอสิต	30	3980.0 ± 216.0	7.9 ± 0.0	4.5 ± 0.8	2.1 ± 0.2	11.4 ± 0.1
	60	508.0 ± 17.7	7.8 ± 0.0	3.9 ± 0.6	1.7 ± 0.2	10.2 ± 0.1
	90	276.4 ± 7.9	7.5 ± 0.0	3.2 ± 0.5	1.7 ± 0.2	9.3 ± 0.1

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานพีเอช = 5.5 – 9.0, ทีดีเอส = 3.0 – 5.0 ก./ล. และซีโอดี = 0.12 – 0.40 ก./ล.



รูปที่ 17 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวชนิดต่าง ๆ



ก) ไม่เชื่อมขวางยาว 30, 60 และ 90 ชม. ข) เชื่อมขวางยาว 30, 60 และ 90 ชม. ค) คอมพอสิตยาว 30, 60 และ 90 ชม.

รูปที่ 18 ลักษณะสีของน้ำหลังการบำบัดด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวชนิดต่าง ๆ

4.5 ผลการศึกษาการม้วนเมมเบรนเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวในกรณีมี Spacer

มีสมมติฐานว่าการใช้สแปเซอร์ (Spacer) แทรกระหว่างชั้นของเมมเบรนที่ม้วนทับกันรอบแกนกลาง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นให้สารปนเปื้อนไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนเข้าสู่ท่อแกนกลางเจาะรูอย่างสม่ำเสมอ น่าจะทำให้ได้ฟลักซ์สูงขึ้น เนื่องจากสแปเซอร์นอกจากทำหน้าที่เป็นตัวรองรับเมมเบรนทำให้เมมเบรนมีความแข็งแรงมากขึ้น ยังเพิ่มช่องว่างระหว่างชั้นของเมมเบรน ส่งผลทำให้น้ำสามารถไหลผ่านเมมเบรนแต่ละชั้นได้ง่ายขึ้น เป็นสาเหตุให้ค่าฟลักซ์ที่ได้เพิ่มมากขึ้น [26-28] ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลการใช้ Spacer 2 ชนิด คือ ผ้าสปันปอนด์และตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก แต่ผ้าสปันปอนด์ที่นำมาใช้เป็น Spacer นี้ ได้จากต่างบริษัทกับที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ (Support layer) ของเมมเบรนแบบคอมพอสิต วัสดุ Spacer ทั้งสองมีความหนา ค่าความสามารถทนต่อแรงดึง และร้อยละ

การยืด ดังแสดงในตารางที่ 8 จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.4.2 ได้สรุปว่ามอดูลที่เตรียมจากเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. เท่านั้น ที่ให้ผลการบำบัดน้ำเสียสีย้อมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งทุก ๆ พารามิเตอร์ แต่มอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นยาว 90 ซม. ทั้งมีการเชื่อมขวางและไม่มีการเชื่อมขวางให้ผลใกล้เคียงกัน ทั้งสมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์หรือประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อม ในส่วนนี้จึงใช้มอดูลทั้ง 2 ประเภท ศึกษาผลการใช้ Spacer ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 30, 60 และ 90 ซม.

ตารางที่ 8 สมบัติทางกล (Mechanical properties) ของวัสดุ Spacer

วัสดุ Spacer	ความหนา (μm)	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)	%การยืด
ผ้าสปันปอนด์	83.6 \pm 3.4	34.3 \pm 4.8	5.2 \pm 1.7
ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก	144.8 \pm 4.1	24.0 \pm 3.1	0.5 \pm 0.1

4.5.1 ผลการศึกษาสมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบมี Spacer

ผลการแทรก Spacer ในมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นยาว 90 ซม. ในตารางที่ 9 แสดงว่าการแทรก Spacer ไม่ว่าจะเป็วัสดุชนิดใดทำให้มอดูลมีความสามารถการแพร่ผ่านน้ำสูงขึ้นมากอย่างชัดเจน เนื่องจากการแทรกสแพเซอร์ช่วยให้เมมเบรนมีช่องว่างระหว่างชั้นมากขึ้น เป็นผลให้น้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ค่าฟลักซ์ที่ได้จึงสูงขึ้น โดยพบว่าวัสดุ Spacer ที่มีความหนามากกว่า เช่นในกรณีตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของเมมเบรนมากกว่าในผ้าสปันปอนด์ ทำให้ค่าฟลักซ์ในตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกสูงกว่าในผ้าสปันปอนด์ ความยาวของสแพเซอร์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของเมมเบรนที่ม้วนทับกันตามสมมติฐานมากกว่า และเป็นผลให้ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำสูงขึ้นตามความยาวของ Spacer ที่มากขึ้น โดยการแทรก Spacer เท่ากับความยาวของเมมเบรนในมอดูล จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของเมมเบรนไปจนตลอดความยาว [2] โดยสมบัติความชอบน้ำของมอดูลที่แทรกสแพเซอร์จะขึ้นกับสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนแต่ไม่ขึ้นกับชนิดวัสดุและความยาว Spacer

ตารางที่ 9 สมบัติค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมี Spacer

มอดูล	ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตร.นิ้ว)						
	ไม่มี Spacer	ความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ (ชม.)			ความยาว Spacer ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก (ชม.)		
		30	60	90	30	60	90
ไม่เชื่อมขวาง 90 ชม.	0.5	1.9	2	2.6	6.6	8.9	15.5
เชื่อมขวาง 90 ชม.	0.2	1.6	1.8	2	2.1	2.5	3.1

หมายเหตุ: ค่าการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ได้จากความชันของกราฟระหว่างฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์กับความดันในช่วง 10 – 50 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว

ผลของการแทรก Spacer ต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์จากกระบวนการเพอร์แควพอเรชันที่ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับ -0.7 บาร์ ดังตารางที่ 10 แสดงว่าเมื่อไม่มี Spacer มอดูลทั้ง 2 แบบให้ฟลักซ์ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมี Spacer ฟลักซ์เพอร์แควพอเรชันจากมอดูลทั้งสองจะแตกต่างกันมากขึ้น เนื่องจากความยาวของ Spacer ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของเมมเบรนมากขึ้น ดังนั้นถ้าเพิ่มความยาวของ Spacer ให้มากขึ้น มีผลให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์สูงขึ้นตามลำดับ [27] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ Spacer ตาข่ายมุ้งลวด อธิบายได้ว่าเนื่องจาก Spacer ตาข่ายมุ้งลวดมีความหนาและคงตัว ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นเมมเบรนเท่า ๆ กันตลอดความยาว Spacer ที่ใช้ จึงทำให้ได้ฟลักซ์เพอร์แควพอเรชันที่แทรก Spacer ตาข่ายมุ้งลวดเพิ่มขึ้นตามความยาว Spacer ด้วย ขณะที่ความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ไม่ได้ให้ฟลักซ์เพอร์แควพอเรชันแตกต่างกันมากนัก เพราะผ้าสปันปอนด์สามารถแนบสนิทกับแผ่นเมมเบรนได้มากกว่า จึงยืนยันความน่าสนใจในการใช้มอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมี Spacer บำบัดน้ำเสียเสียด้วยกระบวนการเพอร์แควพอเรชัน

ตารางที่ 10 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพอร์แวกพอร์ชันของมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นมี Spacer

มอดูล	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์จากกระบวนการเพอร์แวกพอร์ชัน (ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม.)						
	ไม่มี Spacer	ความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ (ชม.)			ความยาว Spacer ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก (ชม.)		
		30	60	90	30	60	90
ไม่เชื่อม ขวาง 90 ชม.	0.7±0.0	12.3±0.2	13.2±0.2	14.6±0.3	25.3±1.2	28.0±1.2	31.5±1.1
เชื่อมขวาง 90 ชม.	0.5±0.0	9.0±0.1	9.6±0.1	10.1±0.2	18.6±0.6	19.7±0.4	21.0±0.4

หมายเหตุ: ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับ -0.7 บาร์

4.5.2 ผลการบำบัดน้ำเสียสีย้อมของมอดูลแบบมี Spacer

ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียจริงในตารางที่ 11 มีค่าต่ำกว่าผลการศึกษากับน้ำบริสุทธิ์เล็กน้อย เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ Concentration polarization แต่สูงกว่ามอดูลที่ไม่แทรก Spacer ที่ความยาวเมมเบรนเท่ากัน โดยมอดูลแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางแทรก Spacer ผ้าสปันปอนด์ความยาว 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ให้เพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 9.2 ± 0.0 , 9.7 ± 0.0 และ 10.6 ± 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ และจะสูงขึ้นเป็น 18.2 ± 0.1 , 19.8 ± 0.1 และ 21.0 ± 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนวัสดุ Spacer เป็นตาข่ายมุ้งลวด สำหรับมอดูลแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางแทรก Spacer ผ้าสปันปอนด์ ให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ดังกล่าวเท่ากับ 6.9 ± 0.0 , 7.4 ± 0.0 และ 7.8 ± 0.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ และเท่ากับ 14.4 ± 0.1 , 15.7 ± 0.1 และ 16.3 ± 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนวัสดุ Spacer เป็นตาข่ายมุ้งลวด

ตารางที่ 11 ค่าฟลักซ์เพอร์แวกพอเรชันจากการบำบัดน้ำเสียของมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่น มี Spacer

มอดูล	ฟลักซ์เพอร์แวกพอเรชันจากการบำบัดน้ำเสีย (ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม.)						
	ไม่มี Spacer	ความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ (ชม.)			ความยาว Spacer ตาข่าย มุ้งลวดพลาสติก (ชม.)		
		30	60	90	30	60	90
ไม่เชื่อมขวาง 90 ชม.	0.5±0.0	9.2±0.0	9.7±0.0	10.6±0.1	18.2±0.1	19.8±0.1	21.0±0.1
เชื่อมขวาง 90 ชม.	0.4±0.0	6.9±0.0	7.4±0.0	7.8±0.0	14.4±0.1	15.7±0.1	16.3±0.1

หมายเหตุ: ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับ -0.7 บาร์

คุณภาพน้ำหลังการบำบัดจากมอดูลแต่ละประเภทที่แทรกวัสดุ Spacer แต่ละชนิดแต่ละความยาวในตารางที่ 12 แสดงว่ามีการสูญเสียประสิทธิภาพการบำบัดในทุก ๆ พารามิเตอร์ไปจากมอดูลที่ไม่แทรก Spacer เล็กน้อย แต่ได้เพอร์มิเอตฟลักซ์สูงขึ้นมาก คุณภาพน้ำหลังการบำบัดจากมอดูลแทรก Spacer ผ้าสปันปอนด์ดีกว่าที่ได้จากมอดูลแทรก Spacer ตาข่ายมุ้งลวดเล็กน้อย มอดูลที่เตรียมจากเมมเบรนเนื้อแน่นเชื่อมขวางให้คุณภาพน้ำหลังการบำบัดดีกว่าที่ได้จากมอดูลที่เตรียมเมมเบรนเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางเช่นเดิมที่ Spacer ชนิดและความยาวเดียวกัน และพบว่าซีโอดีเป็นพารามิเตอร์วิกฤตของงานวิจัยนี้ ดังนั้นรูปแบบการม้วนเมมเบรนโคโตซานเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่เหมาะสมเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียเสียคือใช้เมมเบรนโคโตซานแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. ม้วนรอบแกนกลางเจาะรูไปพร้อมกับ Spacer ผ้าสปันปอนด์ยาวอย่างน้อย 30 ซม. จนเท่ากับ ความยาวเมมเบรน เมื่อดำเนินการแบบเพอร์แวกพอเรชันโดยใช้ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับ -0.7 บาร์ จะให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เท่ากับ 6.9 – 7.8 ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม. มีคุณภาพน้ำของค่าพีเอชของแข็งทั้งหมด ซีโอดี และความเข้มข้นสี เท่ากับ 7.9 – 8.6, 1.5 – 1.7 ก./ล, 0.36 – 0.44 ก./ล. และ 5.1 – 6.2 มก./ล. ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ซีโอดี และความเข้มข้นสีเท่ากับร้อยละ 74 – 77, 91.0 – 92.4 และ 30 – 42 ตามลำดับ จึงสรุปจะใช้มอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. พร้อม Spacer ผ้าสปันปอนด์ยาว 90 ซม. ศึกษาอายุการใช้งานเพราะให้เพอร์มิเอตฟลักซ์สูงสุด โดยมีการสูญเสียคุณภาพน้ำโดยเฉพาะค่าซีโอดีเล็กน้อย

ตารางที่ 12 ฟลักซ์และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่น
แทรก Spacer

มอดูล	Spacer		ฟลักซ์ (ลบ.ชม. ต่อชม. ต่อตร.ม.)	คุณภาพน้ำหลังการบำบัด			
	วัสดุ	ความยาว (ชม.)		พีเอช	ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	ซีไอดี (ก./ล.)	ความเข้มข้นสี (มก./ล.)
ไม่เชื่อมขวาง 90 ซม.	ผ้าสปัน ปอนด์	30	9.2±0.0	8.2±0.0	3.3±0.6	1.4±0.1	6.8±0.2
		60	9.7±0.0	8.4±0.0	3.5±0.6	1.4±0.1	7.3±0.0
		90	10.6±0.1	8.6±0.0	3.6±0.6	1.4±0.1	7.9±0.2
	มุ้งลวด ตาข่าย	30	18.2±0.1	8.9±0.0	3.4±0.5	1.6±0.2	7.2±0.1
		60	19.8±0.1	8.4±0.0	3.6±0.5	1.7±0.1	7.7±0.1
		90	21.0±0.1	7.9±0.0	3.8±0.6	1.7±0.1	8.4±0.3
	ไม่มี Spacer		0.5±0.0	8.0±0.0	2.8±0.6	1.3±0.2	6.5±0.1
เชื่อมขวาง 90 ซม.	ผ้าสปัน ปอนด์	30	6.9±0.0	7.9±0.0	1.5±0.3	0.4±0.1	5.1±0.2
		60	7.4±0.0	8.2±0.0	1.6±0.2	0.4±0.1	5.7±0.2
		90	7.8±0.0	8.6±0.0	1.7±0.3	0.4±0.1	6.2±0.2
	มุ้งลวด ตาข่าย	30	14.4±0.1	8.6±0.0	2.1±0.4	0.7±0.1	5.5±0.1
		60	15.7±0.1	8.1±0.0	2.3±0.4	0.8±0.1	6.2±0.2
		90	16.3±0.1	7.1±0.0	2.4±0.4	0.8±0.1	6.8±0.2
	ไม่มี Spacer		0.4±0.0	8.0±0.0	1.2±0.3	0.3±0.1	4.9±0.2

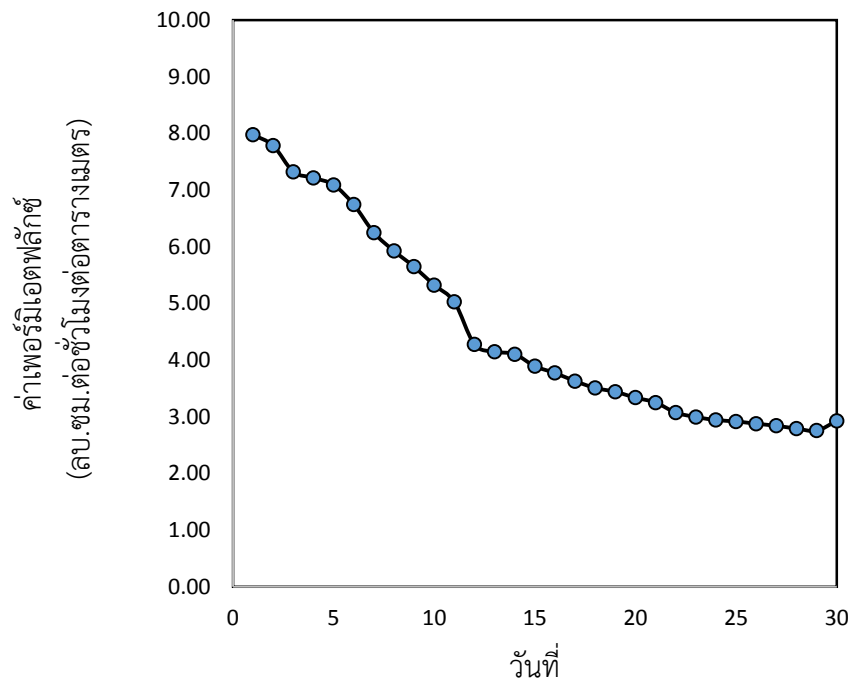
หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานพีเอช = 5.5 – 9.0, ทีดีเอส = 3.0 – 5.0 ก./ล., ซีไอดี = 0.12 – 0.40 ก./ล. และความเข้มข้นสีไม่ระบุ

4.6 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของมอดูลในการบำบัดน้ำเสียสีเขียว

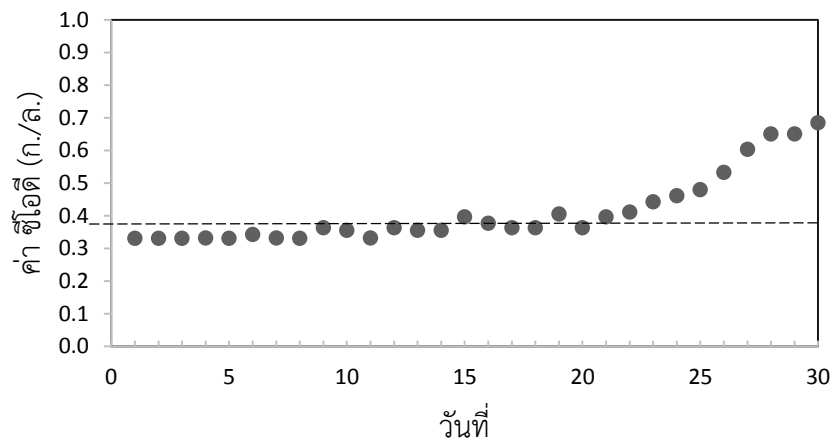
รูปที่ 19 แสดงผลการศึกษาอายุการใช้งานมอดูลที่เลือกคือ มอดูลเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. พร้อม Spacer ผ้าสปันปอนด์ยาว 90 ซม. ในการบำบัดน้ำเสียสีเขียวด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรนซ์ที่ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับ -0.7 บาร์ เป็นเวลา 30 วัน วันละ 8 – 12 ชม. ต่อเนื่องไปโดยไม่มีการล้างมอดูล พบว่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลงจาก 8.0 ± 0.0 ลบ.ชม.ต่อ

ชม.ต่อตร.ม. เหลือเพียง 2.9 ± 0.5 ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม. ในวันที่ 30 แต่ก็ยังสูงกว่าฟลักซ์จากมอดูลที่ไม่ใช้ Spacer การลดลงของเพอร์มิเอตฟลักซ์นี้เนื่องจากการเกิดฟาวลิง (Fouling) ในมอดูล ทำให้ค่าซีไอดีของเพอร์มิเอตเพิ่มขึ้นจาก 0.33 ± 0.20 ก./ล. ในวันที่ 1 เป็น 0.69 ± 0.00 ก./ล. ในวันที่ 30 โดยในวันที่ 21 มีค่าซีไอดีเท่ากับ 0.40 ± 0.09 ก./ล. ซึ่งเริ่มเกินค่ามาตรฐานฯ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามอดูลที่เตรียมขึ้นมีอายุการใช้งานบำบัดน้ำเสียสีย้อมได้อย่างน้อย 21 วัน ซึ่งถือว่าค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับมอดูลเชิงพาณิชย์ที่มีการล้างซึ่งมักออกแบบให้มีอายุ 3-5 ปี [29] แต่การล้างมอดูลก่อให้เกิดน้ำเสียตามมาด้วย ขณะที่การใช้มอดูลที่เตรียมจากเมมเบรนไคโตซานซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์เมื่อแยกวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เหลือทิ้งเฉพาะเมมเบรนไคโตซานน่าจะกำจัดโดยก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่า

ก)



ข)



รูปที่ 19 ผลการใช้อิมมูโนเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. พร้อม Spacer ผ้าสปันปอนด์ ยาว 90 ซม. บำบัดน้ำเสียสีย้อมเป็นเวลา 30 วัน

ก) ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์

ข) ค่าซีไอดี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. เมมเบรนไคโตซานมีสมบัติความชอบน้ำจากมากไปน้อย ดังนี้ เมมเบรนคอมพอสิต > เมมเบรนเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง > เมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง โดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 70.2 ± 1.7 , 77.8 ± 1.3 และ 92.1 ± 1.1 ตามลำดับ และค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์เท่ากับ ∞ , 3.2 และ 1.6 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ
2. ผลการศึกษาการเตรียมมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวไม่มี Spacer
 - 2.1 สมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ของมอดูลในช่วงความดัน 10 – 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ความยาว เมมเบรน (ซม.)	ค่าการแพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม.ต่อซม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		
	ไม่เชื่อมขวาง	เชื่อมขวาง	คอมพอสิต
30	3.1	1.2	188.3
60	1.1	0.3	12.9
90	0.5	0.2	7.9

2.2 ผลการใช้มอดูลบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการเพอร์แควพอเรชันที่ -0.7 บาร์

มอดูล		แบบเนื้อแน่น ไม่เชื่อมขวาง			แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง			แบบคอมพอสิต			
		30	60	90	30	60	90	30	60	90	
ฟลักซ์ (ลบ.ชม./ชม.-ตร.ม.)		6.8±0.2	1.5±0.0	0.5±0.0	6.3±0.1	1.3±0.0	0.4±0.0	3980±216	508±18	276±8	
คุณภาพน้ำหลังการบำบัด	ของแข็ง ทั้งหมด	ก./ล.	4.0±0.4	3.5±0.8	2.8±0.6	2.6±0.3	1.9±0.3	1.2±0.3	4.5±0.8	3.9±0.6	3.2±0.5
		% การ กำจัด	31.7±12.2	48.0±10.5	57.8±6.2	60.9±3.4	71.7±4.6	82.0±3.3	31.6±3.9	41.1±4.2	51.0±6.2
	ซีไอดี	ก./ล.	1.9±0.3	1.7±0.2	1.3±0.2	1.0±0.1	0.8±0.2	0.3±0.1	2.1±0.2	1.7±0.2	1.7±0.2
		% การ กำจัด	60.2±5.4	65.3±3.6	73.4±4.3	78.8±2.3	82.7±4.7	93.6±2.6	56.4±2.5	63.4±4.0	65.4±4.8
	สี	มก./ล.	8.8±0.1	8.4±0.1	6.5±0.1	7.9±0.1	6.4±0.2	4.9±0.2	11.4±0.1	10.2±0.1	9.3±0.1
		% การ กำจัด	49.1±0.8	51.8±1.0	62.7±0.4	54.5±1.2	63.2±0.8	71.9±1.2	34.2±1.2	41.3±0.5	46.7±1.1

3. ผลการศึกษาการเตรียมมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวมี Spacer

- 3.1 ใช้มอดูลแบบเนื้อแน่นทั้งมีการเชื่อมขวางและไม่มีการเชื่อมขวางยาว 90 ซม. ศึกษาผลการใช้ Spacer 2 ชนิด คือ ผ้าสปันปอนด์และตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกที่ความยาว 3 ขนาด คือ 30, 60 และ 90 ซม.
- 3.2 สมบัติการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ของมอดูลในช่วงความดัน 10 – 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

มอดูล	ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (ลบ.ชม.ต่อชม.ต่อตร.ม.ต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว)						
	ไม่มี Spacer	ความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ (ชม.)			ความยาว Spacer ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก (ชม.)		
		30	60	90	30	60	90
ไม่เชื่อมขวาง 90 ซม.	0.5	1.9	2	2.6	6.6	8.9	15.5
เชื่อมขวาง 90 ซม.	0.2	1.6	1.8	2	2.1	2.5	3.1

3.3 ผลการใช้มอดูลบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการเพอร์แควออกซิเจนที่ -0.7 บาร์

มอดูล	แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง 90 ซม.						แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง 90 ซม.							
	ความยาวผ้าสปอน์ด (ซม.)			ความยาวดาวยุ้งลวดพลาสติก (ซม.)			ความยาวผ้าสปอน์ด (ซม.)			ความยาวดาวยุ้งลวดพลาสติก (ซม.)				
	30	60	90	30	60	90	30	60	90	30	60	90		
ฟลักซ์ (ลบ.ซม./ชม.ตร.ม.)	9.2±0.0	9.7±0.0	10.6±0.1	18.2±0.1	19.8±0.1	21.0±0.1	6.9±0.0	7.4±0.0	7.8±0.0	14.4±0.1	15.7±0.1	16.3±0.1		
คุณภาพน้ำหลังการบำบัด	ของแข็งทั้งหมด	ก./ล.	3.3±0.6	3.5±0.6	3.6±0.6	3.4±0.5	3.6±0.5	3.8±0.6	1.5±0.3	1.6±0.2	1.7±0.3	2.1±0.4	2.3±0.4	2.4±0.4
		% การกำจัด	50.5±3.3	47.4±1.0	45.3±2.8	48.1±1.9	45.7±2.8	42.3±2.4	76.9±2.7	75.2±2.3	74.4±2.7	67.7±2.1	65.5±2.5	63.5±1.3
	ซีโอดี	ก./ล.	1.4±0.1	1.4±0.1	1.4±0.1	1.6±0.2	1.7±0.1	1.7±0.1	0.4±0.1	0.4±0.1	0.4±0.1	0.7±0.1	0.8±0.1	0.8±0.1
		% การกำจัด	71.2±2.4	70.5±2.2	69.7±2.5	66.9±3.7	65.2±2.4	64.4±1.3	92.4±1.8	91.4±1.8	90.7±1.9	85.3±2.4	84.3±1.5	83.8±1.8
	ss	มก./ล.	6.8±0.2	7.3±0.0	7.9±0.2	7.2±0.1	7.7±0.1	8.4±0.3	5.1±0.2	5.7±0.2	6.2±0.2	5.5±0.1	6.2±0.2	6.8±0.2
		% การกำจัด	22.9±2.9	17.6±1.2	10.7±1.9	18.6±2.4	13.3±1.8	4.8±3.4	42.1±2.6	35.7±2.2	29.8±3.1	37.3±1.6	30.4±2.7	23.5±2.1

4. สามารถใช้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวของเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางยาว 90 ซม. แทรก Spacer ผ้าสปอน์ดยาว 90 ซม. บำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการเพอร์แควออกซิเจนที่ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับ -0.7 บาร์ เป็นเวลาอย่างน้อย 21 วัน โดยเพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลงจาก 8.0 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อชม.ต่อตร.ม. ในวันที่ 1 เหลือเพียง 3.3 ± 0.0 ลบ.ซม.ต่อชม.ต่อตร.ม. ในวันที่ 21 และมีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นจาก 0.33 ± 0.20 ก./ล. ในวันที่ 1 เป็น 0.40 ± 0.09 ก./ล. ในวันที่ 21

5.2 ข้อเสนอแนะ

พัฒนารูปแบบการม้วนของมอดูลให้มีลักษณะการไหลของน้ำ (Flow pattern) ผ่านมอดูลเป็นแบบ Cross flow เพื่อเพิ่มเพอร์มิเอตฟลักซ์และเพิ่มอายุการใช้งานของมอดูลโดยลดปัญหาการอุดตันจากฟาวลิง เพื่อให้มีความน่าสนใจในการนำไปใช้งานในภาคการผลิตทดแทนการนำเข้ามอดูลจากต่างประเทศ

รายการอ้างอิง

- [1] วนิดา ชูอักษร, เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. 2012. แหล่งที่มา: <http://www.sci.buu.ac.th/research/downloads/journal/2555-1/2555-01-13.pdf> [22 กรกฎาคม 2557]
- [2] กิตติธัช ชื่นสกุลพงศ์, การพัฒนาמודลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซานเพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [3] อานนท์ เศรษฐกรียงไกร และอาภาศณี เสมอมีสุข, น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมพอลิเอทิลีนและตกแต่งสิ่งทอ. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/industrialWater-Effect-TextileIndustry.pdf> [10 สิงหาคม 2557]
- [4] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), ประเภทของสีย้อม. [ออนไลน์]. 2007. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true [1 พฤศจิกายน 2557]
- [5] ชันทอง สุนทรภา, เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] Peteco Viet Nam Equipment Joint Stock Company, Vapor separation. [Online]. 2014. Available from: <http://peteco.com.vn/en/vaporsep-vru-335.htm> [2014, Sep. 29]
- [7] วรณิ ศรีนุตตระกูล, สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ, จากเปลือกกุ้งและกระดองปูสู่ไคโตซาน. [ออนไลน์]. 2010. แหล่งที่มา: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-062.html> [2 มกราคม 2558]
- [8] ดาวปุดแดงทุ่งทองการเกษตร, รู้เรื่องไคติน-ไคโตซาน. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <https://sites.google.com/site/dawpudaengthungthxngkarkestr/daowpoodaeng/periyb-theiyb-kar-chi-puy-xinthriy-khemi/kar-chi-puy-khem/ru-reuxng-khi-tin-khi-to-san> [21 มกราคม 2558]
- [9] Ellouze E., et al., Enhancement of textile wastewater treatment process using Nanofiltration. Desalination 286 (2012): 16-23.

- [10] Bhattacharya P., et al., Crossflow microfiltration using ceramic membrane for treatment of sulphur black effluent from garment processing industry. Desalination 261 (2010): 67-72.
- [11] Sairam M., et al., Spiral-wound polyaniline membrane modules for organic solvent nanofiltration (OSN). Journal of Membrane Science 349 (2010): 123-129.
- [12] Zielinska K., et al., Chitosan hydrogel membranes for pervaporative dehydration of alcohols. Separation and Purification Technology 83 (2011): 114-120.
- [13] Boricha A.G., et al., Preparation of N,O-carboxymethyl chitosan/cellulose acetate blend nanofiltration membrane and testing its performance in treating industrial wastewater. Chemical Engineering Journal 15 (2010): 393-400.
- [14] Chen B., et al., Integrated membrane process for wastewater treatment from production of instant tea powders. Desalination 355 (2015): 147-154.
- [15] Buscio V., et al., Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. Chemical Engineering Journal 265 (2015): 122-128.
- [16] Li J., et al., Performance and membrane fouling in an integrated membrane coagulation reactor (IMCR) treating textile wastewater. Chemical Engineering Journal 240 (2014): 82-90.
- [17] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia, Molecular weight cut-off. [Online]. 2014. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_weight_cut-off [2015, Jun. 19]
- [18] Cui Z., et al., Ionic interactions between sulfuric acid and chitosan membranes. Carbohydrate Polymers 73 (2008): 111-116.
- [19] ASTM International Designation: D882-12, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. [Online]. 2002. Available from: <http://tankpaint.com/wp-content/uploads/D882-02-Thin-Plastic-Sheeting.pdf> [2015, Jan. 31]

- [20] ASTM International Designation: D638-02a, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic. [Online]. 2002. Available from: <http://classes.engr.oregonstate.edu/mime/winter2012/me453-001/Lab1%20-%20Shear%20Strain%20on%20Polymer%20Beam/ASTM%20D638-02a.pdf> [2015,Jan. 31]
- [21] MHOLLAND, Braskem PP CP250H. [Online]. 2015. Available from: <http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=18647&U=1&E=212600> [2015,Mar. 7]
- [22] Nexeo solutions, Braskem PP CP360H. [Online]. 2015. Available from: <http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=6458&E=34500> [2015,Mar. 7]
- [23] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia, Fluorophore. [Online]. 2014. Available from: <http://www.ctgclean.com/tech-blog/wp-content/uploads/The-Filtration-Spectrumosmonics.pdf> [2015, Feb. 19]
- [24] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html [3 พฤษภาคม 2557]
- [25] Mierzwa J.C., et al., Enhancing spiral-wound ultrafiltration performance for direct drinking water treatment through operational procedures improvement: A feasible option for the Sao Paulo Metropolitan Region. Desalination 307 (2012): 68–75.
- [26] Karabela A.J., et al., Modeling of spiral wound membrane desalination modules and plants – review and research priorities. Desalination 356 (2015): 165-186.
- [27] Sablani S.S., et al., Influence of spacer thickness on permeate flux in spiral-wound seawater reverse osmosis systems. Desalination 146 (2002): 225-230.
- [28] Balster J., et al., Multi-layer spacer geometries with improved mass transport. Journal of Membrane Science 282 (2006): 351-361.
- [29] Du Y., et al., Optimization of Reverse Osmosis Networks with Spiral-Wound Module. Industrial & Engineering Chemistry Research 51 (2012): 11764-11777.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

1. Chemical oxygen Demand หรือ COD

COD เป็นการวัดค่าความสกปรกของน้ำ โดยเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในน้ำ ข้อดีของ COD คือ สามารถทำการหาค่าได้โดยใช้เวลาไม่เกิน 3 ชั่วโมง สามารถเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพน้ำได้ทันที ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

1.1 แบบ Open reflux method สามารถใช้วัดของเสียได้หลายชนิด แต่ต้องใช้สารตัวอย่างและสารเคมีในปริมาณมากในการตรวจวัด

1.2 แบบ Close reflux, titrimetric method วิธีนี้ประหยัดสารตัวอย่างและสารเคมี แต่สารตัวอย่างที่ใช้ต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เพราะหากไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดการคลาดเคลื่อน ข้อดีของวิธีนี้คือสารตัวอย่างจะถูกออกซิไดซ์ได้ดีกว่าในระบบเปิดแบบแรก

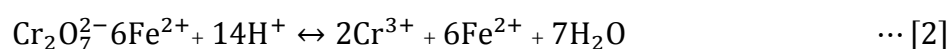
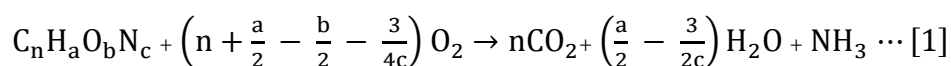
1.3 แบบ Close reflux, colorimetric method วิธีนี้ใช้หลักการเดียวกับแบบ Close reflux, titrimetric method แต่จะนำสารตัวอย่างมาวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer แทนการนำสารตัวอย่างมาทำการไตเตรท

วิธีที่ใช้คือแบบที่ 1.2 Close reflux, titrimetric method

หลักการ

การใช้สารออกซิไดซ์ในงานวิจัยนี้ใช้โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ที่ทราบความเข้มข้นและปริมาณที่แน่นอนในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ไปทำการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ในน้ำเสียเสีย้อม โดยใช้วิธีรีฟลักซ์แบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมต(สารออกซิไดซ์)ที่เหลือ โดยวิธีการไตเตรท เพื่อคำนวณหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในรูปของปริมาณออกซิเจน จากนั้นทำการคำนวณหาค่าโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือ ใช้เฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นโดยทำการไตเตรท เมื่อถึงจุดยุติสีของสารละลายจะเปลี่ยนไปจากสีฟ้าอมเขียวไปเป็นสีน้ำตาลแดง

สมการที่เกี่ยวข้อง



เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. หลอดแอมพลูขนาด 16 × 100 และฝาปิด TFE (TFE-coated Caps) ที่มีสภาพสมบูรณ์

2. ฮีตติงบล็อก (Heating block) ซึ่งเป็นช่องที่ตั้งของหลอดแอมพลู ซึ่งให้ความร้อนและควบคุมให้อยู่ในอุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส

3. สารมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 294.185 กรัม/โมล อบสารที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

4. เมอร์คิวรี ซัลเฟต ($HgSO_4$)

5. ซิวเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)

6. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)

7. อินดิเคเตอร์ Ferroin

1,10 – ฟีนานโทลีน โมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate) ปริมาณ 1.485 กรัม และไอร์รอน (II) ซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ปริมาณ 695 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 100 มิลลิลิตร

8. สารมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulphate, FAS)

9. สารละลายไดเจสต์ (0.0167 M สารมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต)

โดยทำการละลายสารมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ปริมาณ 0.4913 กรัม ที่อบแล้วในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 16.7 มิลลิลิตร จากนั้นรอกจนกระทั่งเย็น แล้วทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 100 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. ล้างหลอดแอมพลู และฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์

2. ใช้สารเคมีและปริมาตรน้ำตัวอย่าง ดังตารางต่อไปนี้

ขนาดของภาชนะ ย่อยสลาย	ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลายในการ ย่อยสลาย (มิลลิลิตร)	กรดซัลฟิวริก รีเอเจนต์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
หลอดย่อยสลาย				
16 × 100 มล.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 × 150 มล.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 × 150 มล.	10.0	6.0	14.0	30.0
แอมพูล มาตรฐาน				
10 มล.	2.5	1.5	3.5	7.5

3. นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลาย แล้วทำการเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต

4. ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ลงในหลอด

5. ปิดจุกหลอดแอมพูลให้สนิท แล้วทำการคว่ำหลอดไปมาเพื่อให้สารผสมกันทั่วถึง

6. นำหลอดแอมพูลไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้จนเย็น

7. เปิดฝาจุก ทำการเทแอมพูลลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) แล้วหยดเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 0.05 – 0.1 มิลลิลิตร (1 หรือ 2 หยด) จากนั้นไตเตรทด้วยเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulphate) เมื่อถึงจุดยุติสารตัวอย่างจะเปลี่ยนสีจากฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

8. ทำเช่นเดียวกันแต่ใช้น้ำกลั่นแทนสารตัวอย่าง โดยการรีฟลักซ์น้ำกลั่น (blank) แล้วทำการไตเตรทแบลนด์ ซึ่งมีรีเอเจนต์และปริมาตรน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรของสารตัวอย่าง

9. ทำเช่นเดียวกันแต่ใช้สารละลายซีโอดีมาตรฐานแทนสารตัวอย่าง โดยใช้รีเอเจนต์ต่าง ๆ เหมือนกับที่ใช้กับสารตัวอย่าง จากนั้นทำการคำนวณหาค่าซีโอดีเพื่อตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์

วิธีการคำนวณหาค่าซีโอดี

$$\text{COD} = (A-B)(8000M)/C$$

เมื่อ COD = ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

A = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (โมลาร์)

C = ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS)

ของแข็งในน้ำ หมายถึง สารทุกอย่างที่อยู่ในน้ำ เช่น ของแข็งและสารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่รวมถึงสารที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น กรดต่างๆ ที่ละลายในน้ำ การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งในน้ำ ทำโดยการชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) จากนั้นรายงานผลในรูปน้ำหนักสารต่อปริมาตรของน้ำตัวอย่าง เป็นการหาค่าของปริมาณสารตัวอย่างที่เหลืออยู่ในภาชนะ หลังระเหยน้ำออกจากตัวอย่างน้ำออกจนหมดโดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ปีกเกอร์แก้ว (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เดสิคเคเตอร์ (Desiccator)
4. เครื่องชั่งละเอียด (Analytic balance)
5. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส

วิธีการวิเคราะห์

1. นำซามระเหยไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วนำมาชั่งจนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่ จากนั้นจดน้ำหนัก (B กรัม) และนำไปเก็บไว้ในเดสิคเคเตอร์จนกว่าจะนำไปใช้

2. ตวงปริมาณน้ำตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. เทตัวอย่างใส่ชามระเหย แล้วนำชามระเหยไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. ปล่อยสารในชามตัวอย่างให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ แล้วจดน้ำหนัก (A กรัม)

วิธีการคำนวณ

$$\text{Total Solid (TS)} = ((A-B) \times 1000) / C$$

เมื่อ TS = ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)

A = น้ำหนักของตัวอย่างและชามระเหย (มิลลิกรัม)

B = น้ำหนักของชามระเหย (มิลลิกรัม)

C = ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิกรัม)

3. ค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

ค่าการดูดกลืนแสง หมายถึง การวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงสีขาวยาวมีความยาวคลื่น 190 – 1,000 นาโนเมตร ส่วนใหญ่จะใช้วิเคราะห์หาสารอินทรีย์, สารอนินทรีย์ หรือ สารประกอบเชิงซ้อน สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน ซึ่งการดูดกลืนนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของสารนั้น

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมผงสารตัวอย่าง 3 สี คือ สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีแดง มาทำการผสมกันอย่างละ 1 หน่วยเท่าๆ กัน จากนั้นทำการปรับปริมาตรโดยการเติมน้ำกลั่นลงไปในขวดปรับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ทำการเขย่าให้เข้ากัน
2. นำสารที่เตรียมจากข้อที่ 1 มาทำการเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังต่อไปนี้ 0.1, 0.08, 0.06, 0.04, 0.02 ก./ล. ทำการหา Calibration curve ที่มีค่าความเข้มข้นเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ความยาวคลื่นที่ดีที่สุดเท่ากับ 535 นาโนเมตร ซึ่งได้ค่าแอมบอร์แบนซ์ (Absorbance) เท่ากับ 0.0708 ± 0.0008
3. นำสารตัวอย่างทั้งหมดมาทำการวัดที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้

วิธีการคำนวณ

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสง } A = \epsilon lc$$

A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)

ϵ = เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืน โดยวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง
Molar absorptivity ($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)

L = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (cm)

c = ความเข้มข้น (M)



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. วิธีหาค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

วิธีการคำนวณหาค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง

$$\text{ปริมาณเพอร์มิเอตที่ได้ (Q)} = 1 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่ผิวของเมมเบรน (A)} = 1.1341 \times 10^{-3} \text{ ตารางเมตร}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในการทดลอง (\Delta t)} = 4 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } J &= Q / A\Delta t \\ &= 1 / (1.1341 \times 10^{-3} \times 4) \\ &= 220.439 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร} \end{aligned}$$

2. วิธีการหาค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียสีย้อม

วิธีการคำนวณหาค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียสีย้อม จากกรรมวัณเมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นเชื่อมขวาง 90 ซม. ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว ที่ความดัน -0.7 บาร์

$$\text{ปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (Q)} = 1 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่ผิวของเมมเบรน (A)} = 0.207 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\text{เวลาที่เก็บเพอร์มิเอต (\Delta t)} = 11.30 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } J &= Q / A\Delta t \\ &= 1 / (0.207 \times 11.30) \\ &= 0.428 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อชั่วโมงต่อ} \\ &\quad \text{ตารางเมตร} \end{aligned}$$

3. การคำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดต่างๆ (% Removal)

เช่น ค่าประสิทธิภาพการกำจัดจากการม้วนเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง 90 ซม.

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียสีย้อม (\%)} = \frac{(\text{น้ำเสียสีย้อมขาเข้า} - \text{น้ำเสียสีย้อมขาออก}) \times 100}{\text{น้ำเสียสีย้อมขาเข้า}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ประสิทธิภาพการกำจัด TS คิดเป็น (%) ในน้ำเสียสีย้อม

$$\text{TS น้ำเสียขาเข้า} = 6.63 \text{ กรัม/ลิตร}$$

$$\text{TS น้ำเสียขาออก} = 1.20 \text{ กรัม/ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TS} &= \frac{(6.63 - 1.20) \times 100}{6.63} \\ &= 82.02 \% \end{aligned}$$

ในกรณีที่เป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเมมเบรนต่างชนิด ที่ความยาวต่างกัน ก็คำนวณเช่นเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัด COD คิดเป็น (%) ในน้ำเสียสีย้อม

$$\text{COD น้ำเสียขาเข้า} = 4.76 \text{ กรัม/ลิตร}$$

$$\text{COD น้ำเสียขาออก} = 0.30 \text{ กรัม/ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD} &= \frac{(4.76 - 0.30) \times 100}{4.76} \\ &= 93.6 \% \end{aligned}$$

ในกรณีที่เป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเมมเบรนต่างชนิด ที่ความยาวต่างกัน ก็คำนวณเช่นเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัดสี คิดเป็น (%) ในน้ำเสียสีย้อม

$$\text{ความเข้มข้นสีน้ำเสียขาเข้า} = 17.40 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\text{ความเข้มข้นสีน้ำเสียขาออก} = 4.89 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} &= \frac{(17.40 - 4.89) \times 100}{17.40} \\ &= 71.91 \% \end{aligned}$$

4. วิธีการเตรียมสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่มีความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่น้ำหนักโมเลกุล 4,000 ให้มีความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร

ซึ่งสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่น้ำหนักโมเลกุล 4,000 จำนวน 1 กรัม เป็นสถานะของแข็ง เติมน้ำในน้ำ 1 ลิตร

5. วิธีหาค่าร้อยละการกักกัน

วิธีคำนวณหาค่าร้อยละการกักกันสารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 4,000 ดอลตัน ของเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง

$$C_p = 701 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$C_f = 13,926 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\%R = \frac{(13,926 - 701) \times 100}{13,926}$$

$$13,926$$

ดังนั้น ได้ค่าร้อยละการกักกัน = 94.97 %

ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง

1. ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

ตารางที่ ค-1 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรนไคโตซาน	ความดันที่เป็นแรงขับ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
แบบไม่เชื่อมขวาง	50	349.9±5.9
	100	498.7±13.1
	150	662.2±28.7
	200	842.0±60.8
	250	954.6±40.0
	300	1,158±68.4
แบบเชื่อมขวาง	50	221.9±2.0
	100	277.8±3.7
	150	360.2±3.7
	200	430.8±6.3
	250	506.0±17.6
	300	632.6±18.5

2. MWCO ของเมมเบรนไคโตซาน

ตารางที่ ค-2 ร้อยละการกักกันสารละลาย PEG ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ

ชนิด เมมเบรน	ร้อยละการกักกัน						
	PEG 350	PEG 550	PEG 1,450	PEG 4,000	PEG 6,000	PEG 10,000	PEG 35,000
แบบไม่เชื่อมขวาง	49.0	79.9	90.0	93.3	94.3	95.3	97.3
แบบเชื่อมขวาง	57.5	90.0	91.4	95.0	96.3	97.4	99.1
แบบคอมพอสิต	46.4	68.9	86.4	89.3	90.4	91.2	92.0

3. ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว



ตารางที่ ค-3 พลิกซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนโคโตะซานแบบไม่เชื่อมขวาง เชื่อมขวาง และคอมพอลิต

ความยาว เมมเบรน (ซม.)	ความดัน (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	แบบไม่เชื่อมขวาง	แบบเชื่อมขวาง	แบบคอมพอลิต
		ค่าพลิกซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)		
30	10	105.9±0.4	7.6±0.1	3,224.9±32.6
	20	123.3±0.4	19.8±1.2	4,014±69.1
	30	156.7±0.9	31.4±1.4	5,057±117.4
	40	199.1±0.9	43.1±2.4	7,209.4±167.9
	50	223.6±4.4	57.2±2.9	11,039.0±673.5
40	10	33.3±1.0	7.3±0.0	2,703.8±104.9
	20	49.6±0.9	17.7±0.2	3,582±139.3
	30	73.4±1.2	24.6±0.3	4,489.5±201.8
	40	83.6±1.7	31.8±0.6	5,758.5±297.0
	50	108.6±2.7	40.7±1.1	9,190.8±922.3
50	10	12.3±0.2	3.6±0.0	1,233.6±34.3
	20	25.8±0.3	7.9±0.0	1,549.8±70.9
	30	48.7±8.4	11.7±1.5	1,785.6±91.3
	40	48.7±1.4	14.4±0.3	2,553.2±221.0
	50	56.5±1.5	14.9±0.4	3,297±213.5
60	10	8.7±0.1	3.5±0.0	1,066±14.5
	20	21.2±0.6	6.6±0.1	1,232.9±6.7
	30	36.7±2.0	9.6±0.3	1,373±0.0
	40	43.9±1.3	12.6±0.3	1,451.3±28.3
	50	54.6±0.8	14.7±0.4	1,601.0±33.7
90	10	5.05±0.05	2.1±0.0	718.1±5.7
	20	7.11±0.10	4.0±0.1	782.9±13.0
	30	15.91±0.48	5.7±0.1	894.7±10.5
	40	20.00±1.14	7.5±0.2	950.6±16.6
	50	25.68±1.25	9.7±0.3	1028.0±11.6

ตารางที่ ค-4 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง 90 ซม. โดยมี Spacer เป็น
 ฝ้าสปันปอนด์และตาข่ายมุ้งลวด ยาว 30, 60 และ 90 ซม. แทรกอยู่ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ชนิดเมมเบรน	ความยาว spacer (ซม.)	ความดัน (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	ฝ้าสปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวด พลาสติก
			ค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)	
แบบไม่เชื่อมขวาง 90 ซม.	30	10	42.6±0.2	72.7±0.5
		20	60.5±0.3	112.3±1.1
		30	74.5±0.4	182.3±3.1
		40	99.8±0.9	263.0±4.0
		50	116.5±1.0	326.9±7.7
	60	10	44.6±0.1	76.5±0.5
		20	64.5±0.3	121.4±1.1
		30	78.5±0.4	241.4±4.9
		40	107.1±0.8	326.5±7.2
		50	125.6±1.3	419.7±18.7
	90	10	46.3±0.3	82.9±0.7
		20	69.7±0.8	137.9±1.2
		30	86.3±1.3	293.3±7.1
		40	122.7±2.4	417.6±16.5
		50	148.5±3.4	718.0±45.1

ตารางที่ ค-5 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง 90 ซม. โดยมี Spacer เป็นผ้าสปันปอนด์ และตาข่ายมุ้งลวด ยาว 30, 60 และ 90 ซม. แทรกอยู่ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ชนิดเมมเบรน	ความยาว spacer (ซม.)	ความดัน (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	ผ้าสปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวด พลาสติก
			ค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)	
แบบเชื่อมขวาง 90 ซม.	30	10	19.3±0.1	38.8±0.3
		20	32.5±0.2	51.5±0.5
		30	45.9±0.4	73.2±1.1
		40	64.0±0.7	91.9±1.4
		50	81.8±0.9	123.2±2.9
	60	10	19.7±0.1	40.4±0.3
		20	34.3±0.2	54.2±0.4
		30	48.0±0.4	79.8±1.2
		40	71.4±0.9	105.0±1.8
		50	89.7±1.4	142.3±3.6
	90	10	20.3±0.1	42.4±0.3
		20	35.6±0.2	58.9±0.7
		30	50.2±0.5	88.7±1.4
		40	79.1±1.3	124.0±2.9
		50	101.0±1.9	167.1±5.0

4. คุณภาพน้ำจากการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี Spacer ยาว 30, 60 และ 90 ซม.

ตารางที่ ค-6 คุณภาพน้ำจากการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี Spacer ยาว 30, 60 และ 90 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนโคโตะซานแบบไม่เชื่อมขวาง

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำหลังจากการบำบัดด้วยเมมเบรนโคโตะซาน แบบไม่เชื่อมขวาง					
	ผ้าสปันปอนด์ (ซม.)			ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก (ซม.)		
	30	60	90	30	60	90
พีเอช	8.2±0.0	8.4±0.0	8.6±0.0	8.9±0.0	8.4±0.0	7.9±0.0
ของแข็ง ทั้งหมด (ก./ล.)	3.3±0.6	3.5±0.6	3.6±0.6	3.4±0.5	3.6±0.5	3.8±0.6
ซีโอดี (ก./ล.)	1.4±0.1	1.4±0.1	1.4±0.1	1.6±0.2	1.7±0.1	1.7±0.1
สี (มก./ล.)	6.8±0.2	7.3±0.0	7.9±0.2	7.2±0.1	7.7±0.1	8.4±0.3

ตารางที่ ค-7 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี Spacer ยาว 30, 60 และ 90 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนโคโตซานแบบเชื่อมขวาง

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำหลังจากการบำบัดด้วยเมมเบรนโคโตซาน แบบเชื่อมขวาง					
	ผ้าสปันปอนด์ (ซม.)			ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก (ซม.)		
	30	60	90	30	60	90
พีเอช	7.9±0.0	8.2±0.0	8.6±0.0	8.6±0.0	8.1±0.0	7.1±0.0
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	1.5±0.3	1.6±0.2	1.7±0.3	2.1±0.4	2.3±0.4	2.4±0.4
ซีโอดี (ก./ล.)	0.4±0.1	0.4±0.1	0.4±0.1	0.7±0.1	0.8±0.1	0.8±0.1
สี (มก./ล.)	5.1±0.2	5.7±0.2	6.2±0.2	5.5±0.1	6.2±0.2	6.8±0.2

5. ศึกษาอายุการใช้งานของผ้าสปันบอนด์ 90 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง 90 ซม.

ตารางที่ ค-8 ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าซีโอดีทั้งหมดของผ้าสปันบอนด์ 90 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง 90 ซม.

วันที่	ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสีย ที่ความดัน -0.7 บาร์ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)	ซีโอดี (ก./ล.)
1	8.0±0.0	0.3±0.2
2	7.8±0.0	0.3±0.2
3	7.3±0.0	0.3±0.1
4	7.2±0.0	0.3±0.2
5	7.1±0.0	0.3±0.0
6	6.7±0.0	0.3±0.2
7	6.3±0.0	0.3±0.1
8	5.9±0.0	0.3±0.1
9	5.6±0.0	0.4±0.1
10	5.3±0.0	0.4±0.1
11	5.0±0.0	0.3±0.2
12	4.3±0.0	0.4±0.1
13	4.1±0.0	0.4±0.1
14	4.1±0.0	0.4±0.1
15	3.9±0.0	0.4±0.1
16	3.8±0.0	0.4±0.1
17	3.6±0.0	0.4±0.1
18	3.5±0.0	0.4±0.2
19	3.4±0.0	0.4±0.2
20	3.3±0.0	0.4±0.1
21	3.3±0.0	0.4±0.1

ตารางที่ ค-9 ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าซีไอดีทั้งหมดของผ้าสปันบอนด์ 90 ซม. ม้วนเข้ากับ
เมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง 90 ซม. (ต่อ)

วันที่	ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสีย ที่ความดัน -0.7 บาร์ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)	ซีไอดี (ก./ล.)
22	3.1±0.0	0.4±0.2
23	3.0±0.0	0.5±0.2
24	2.9±0.0	0.5±0.1
25	2.9±0.0	0.5±0.1
26	2.9±0.0	0.5±0.2
27	2.8±0.0	0.6±0.2
28	2.8±0.0	0.7±0.1
29	2.8±0.0	0.7±0.1
30	2.9±0.5	0.7±0.0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชญาภา ภูชัยนันท์ เกิดเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 (The 24th International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICHE 2014)) ณ โรงแรม ฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

