

การพัฒนาמודลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซานเพื่อบำบัดน้ำทิ้งจาก
บ่อหมักแก๊สชีวภาพ



นายกิตติช ชื่นสกุลพงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

DEVELOPMENT OF SPIRAL WOUND CHITOSAN MEMBRANE MODULE FOR TREATING
BIOGAS DIGESTER EFFLUENT

Mr. Kittitat Cheunsakulpong



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาโมดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซานเพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ

โดย

นายกิตติธัช ชื่นสกุลพงศ์

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลรัตน์ ตระการพุกฤษ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

กิตติธัช ชื่นสกุลพงค์ : การพัฒนา 모듈แบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซานเพื่อ
บำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ. (DEVELOPMENT OF SPIRAL WOUND
CHITOSAN MEMBRANE MODULE FOR TREATING BIOGAS DIGESTER
EFFLUENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ชันทอง สุนทรภา, 60 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเมมเบรนไคโตซานเชิงพาณิชย์ 3 ชนิด ได้แก่ แบบคอมพอสิตบนผ้าสปัน
ปอนด์ แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง มาม้วนรอบแกนกลาง
เจาะรู เพื่อทำเป็นมอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว ศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ ชนิดของเมมเบรน
ไคโตซาน ความยาวของเมมเบรน (100, 60 และ 20 ซม.) วัสดุ (ผ้าสปันปอนด์และตาข่ายมุ้งลวด
พลาสติก) และความยาว (100, 60 และ 20 ซม.) ของสแปเซอร์ (Spacer) ต่อประสิทธิภาพการ
บำบัดน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพ จากการศึกษาสมบัติของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด พบว่า ลำดับ
ความชอบน้ำเรียงจากมากไปน้อย คือ แบบคอมพอสิต > แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง > แบบ
เนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง ขนาดรูพรุนเมมเบรนในเทอมของค่า Molecular weight cutoff
(MWCO) ของเมมเบรนแบบคอมพอสิต แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการ
เชื่อมขวาง เท่ากับ 5000, 1000 และ 500 ดอลตัน ตามลำดับ การเชื่อมขวางทำให้ค่า
ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำลดลง แต่ทำให้มอดูลมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น ในเมม
เบรนชนิดเดียวกัน เมื่อความยาวของเมมเบรนมากขึ้น มอดูลมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น
การใช้สแปเซอร์ทั้งผ้าสปันปอนด์ และตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกม้วนเข้ากับเมมเบรน ทำให้
ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่การใช้สแปเซอร์ที่เป็นผ้าสปันปอนด์ให้ประสิทธิภาพ
การบำบัดน้ำเสียสูงกว่าการใช้สแปเซอร์ที่เป็นตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก การเพิ่มความยาวของ
สแปเซอร์ผ้าสปันปอนด์ ทำให้ได้ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำ และค่าเพอร์มิเอตพลักซ์เพิ่ม
มากขึ้น ได้รูปแบบการม้วนเมมเบรนที่เหมาะสม คือ ใช้เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง
ยาว 100 ซม. ม้วนเข้ากับสแปเซอร์ผ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. สามารถกำจัดซีโอดี ของแข็ง
ทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ทีเคเอ็น และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด ได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ
92.9±2.5, 71.3±1.3, 87.9±2.1, 90.9±2.1 และ 87.5±0.4 ตามลำดับ จากน้ำเสียดิบตั้งต้นที่
เตรียมจากมูลสุกรเท่ากับ 4.0±0.2, 5.0±0.2, 3.6±0.1, 1.8±0.0 และ 94.1±0.8 ก./ล. ตามลำดับ
มอดูลนี้มีอายุการใช้งานประมาณ 22 วัน

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5372485223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: CHITOSAN MEMBRANE / SPIRAL WOUND MODULE / WASTEWATER TREATMENT

KITTITAT CHEUNSAKULPONG: DEVELOPMENT OF SPIRAL WOUND CHITOSAN MEMBRANE MODULE FOR TREATING BIOGAS DIGESTER EFFLUENT. ADVISOR: ASSOC. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, 60 pp.

Three types of commercial chitosan membranes were used in this research. They were composite on spunbond fabric, dense uncrosslinked and dense crosslinked membranes. The spiral wound membrane module was prepared by rolling the desired membrane around a perforated core. The studied parameters were membrane types, membrane length of 100, 60 and 20 cm. materials (spunbond fabric and plastic wire screen) and length (100, 60 and 20 cm.) of spacer. The module was tested for its application on treating the anaerobic digestion effluent. It was found that the hydrophilicity order of the studied membranes were composite > uncrosslinked dense > crosslinked dense membranes. The molecular weight cutoff (MWCO) of composite, uncrosslinked dense and crosslinked dense membranes were 5000, 1000 and 500 daltons, respectively. The crosslinking of chitosan membrane decreased the water permeability but increased the treatment efficiency. On the same membrane type, increasing the membrane length resulted in the better treatment performance. The presence of a spacer in the module increased the water permeability. However, the module with the spunbond spacer provided the better treatment performance than the one with plastic wire screen spacer. By increasing the spunbond spacer length, the water permeability and permeate flux were increased. The appropriate configuration was obtained from rolling the dense crosslinked membrane of 100 cm. together with the spunbond spacer of 100 cm. The removal efficiencies in COD, total solids, total volatile solids, TKN and total organic carbon were 92.9 ± 2.5 , 71.3 ± 1.3 , $87.9 \pm 2.1\%$, $90.9 \pm 2.1\%$ and $87.5 \pm 0.4\%$, respectively. Those of the raw feed prepared from the pig manure were 4.0 ± 0.2 g/l, 5.0 ± 0.2 g/l, 3.6 ± 0.1 g/l, 1.8 ± 0.0 g/l and 94.1 ± 0.8 g/l. respectively. The module had a lifetime of 22 days.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเมมเบรนเพื่อการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์การวิเคราะห์สมบัติความชอบน้ำของเมมเบรน

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤกษ์ และดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกสำหรับการใช้เครื่องมือในการทดลองและห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	3
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.....	3
2.2 เทคโนโลยีเมมเบรน	5
2.3 เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane).....	9
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3	12
เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	12
3.1 วัสดุดิบ	12
3.2 ชุดทดสอบมอดูลเมมเบรน	12
3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	12
3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน	13
3.4.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology).....	13
3.4.2 การศึกษาความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength).....	13
3.4.3 การศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรน (Hydrophilicity)	14

3.4.4 การศึกษาหาขนาดรูพรุนเมมเบรน	15
3.5 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ.....	16
3.6 การทดลองมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว.....	17
บทที่ 4	19
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	19
4.1 ผลการศึกษาสมบัติของเมมเบรนไคโตซาน.....	19
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐาน.....	19
4.1.2 ผลการศึกษาความสามารถทนต่อแรงดึง.....	21
4.1.3 ผลการทดสอบความชอบน้ำ.....	22
4.1.4 ผลการทดสอบค่า Molecular weight cutoff (MWC0).....	23
4.2 คุณภาพน้ำเสียดิบ.....	24
4.3 ผลการศึกษามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบไม่มี Spacer.....	25
4.3.1 สมบัติความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล.....	25
4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว	26
4.4 ผลการศึกษามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี Spacer.....	28
4.4.1 ผลของการใช้ Spacer ยาว 20 ซม.....	29
4.4.2 ผลของความยาวของ Spacer.....	32
4.5 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของมอดูลในการบำบัดน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพ.....	34
บทที่ 5	35
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
รายการอ้างอิง	40
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก.....	44
วิธีการวิเคราะห์.....	44
ภาคผนวก ข.....	50

ตัวอย่างการคำนวณ	50
ภาคผนวก ค.....	53
ข้อมูลผลการทดลอง.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	60



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	คุณภาพทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพ	5
ตารางที่ 2	ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน	7
ตารางที่ 3	การเปรียบเทียบมอดูลเมมเบรน	8
ตารางที่ 4	ความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืดของเมมเบรนไคโตซาน	21
ตารางที่ 5	ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซาน.....	22
ตารางที่ 6	คุณภาพน้ำเสียดิบ	25
ตารางที่ 7	ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว	26
ตารางที่ 8	ค่าฟลักซ์และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว	27
ตารางที่ 9	ผลของการใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ต่อค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล	29
ตารางที่ 10	ค่าฟลักซ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่ใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ในการบำบัดน้ำเสีย....	30
ตารางที่ 11	ผลของความยาว Spacer ต่อคุณภาพน้ำจากมอดูลของเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง ยาว 100 ซม.....	32

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน	6
รูปที่ 2 ลักษณะการไหลของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน	6
รูปที่ 3 ลักษณะของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว	9
รูปที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	9
รูปที่ 5 เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5K	14
รูปที่ 6 ลักษณะและขนาดที่ใช้ทดสอบเมมเบรนแบบคอมพอสิต	14
รูปที่ 7 ชุดทดสอบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ	15
รูปที่ 8 มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวและแผนผังชุดการทดลอง	17
รูปที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน	19
รูปที่ 10 ภาพภาคตัดขวาง SEM ของเมมเบรนไคโตซาน	20
รูปที่ 11 สมบัติความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน	23
รูปที่ 12 กราฟ MWCO ของเมมเบรนไคโตซานจากค่าร้อยละการกักกันสารละลาย PEG	24
รูปที่ 13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนชนิดต่าง ๆ และที่ความยาวต่าง ๆ กัน	28
รูปที่ 14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเมื่อใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง	31
รูปที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเมื่อใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง	31
รูปที่ 16 ผลของความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม.	33
รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากมอดูลเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง ยาว 100 ซม. และมี Spacer ผ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. เมื่อใช้บำบัดน้ำเสีย	34
รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอทีในน้ำเพอร์มิเอตจากมอดูลเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง ยาว 100 ซม. และมี Spacer ผ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. เมื่อใช้บำบัดน้ำเสีย	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นแหล่งกำเนิดชีวิตของสัตว์และพืช และยังเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำเนินกิจกรรมในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ซึ่งเมื่อน้ำดีถูกใช้ไปในการดำเนินกิจกรรมก็จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปของน้ำเสีย ถึงแม้โรงงานอุตสาหกรรมจะถูกควบคุมโดยกระทรวงอุตสาหกรรมให้มีระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อบำบัดน้ำจากกระบวนการผลิตก่อนทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะก็ตาม แต่ก็ยังมีความไม่มั่นใจในประสิทธิภาพของระบบบำบัด โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงปานกลาง หรือน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรม เช่น จากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ซึ่งมักไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียของแหล่งน้ำสาธารณะ ประเทศไทยโดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [1] ให้การสนับสนุนผู้ประกอบการจากภาคปศุสัตว์ ภาคอุตสาหกรรม และภาคชุมชน เร่งลงทุนก่อสร้างระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสีย และของเสีย ให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของความร้อนและไฟฟ้า แต่จากเทคโนโลยีของบ่อหมักแก๊สชีวภาพทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบยังมีความสกปรกสูง จึงควรทำการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียขั้นหลังเพื่อเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีการนำมาใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) กับน้ำเสียทั้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมที่มีความสกปรกในรูปของค่าความเข้มข้นซีโอดีมากกว่า 1,000 มก./ล. [2] เพื่อทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ และได้แก๊สชีวภาพใช้เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งต้องตามด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นหลังเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง [3] แต่การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนต้องการพลังงานสูงในการเติมอากาศ และ/หรือ ต้องการพื้นที่สำหรับการดำเนินระบบสูง จึงเป็นปัญหาที่ต้องการเสาะหาเทคโนโลยีทางเลือกอื่น มาใช้แทนระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้ โดยการเลือกใช้เมมเบรนขอบน้ำ แต่เทคโนโลยีเมมเบรนไม่ใช้กันแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากนับแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันวัสดุเมมเบรนและมอดูลเมมเบรนต้องนำเข้าทั้งหมด ทำให้มีราคาแพง แต่ปัจจุบันเมมเบรนโคโตะซานสามารถผลิตได้ในประเทศ โดยวัสดุโคโตะซานเป็นวัสดุชีวภาพที่สกัดมาจากไคติน มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับเซลลูโลส แต่โคโตะซานจะมีหมู่อะมิโน (Amino group) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ทำให้มีสมบัติขอบน้ำ [4] จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาพัฒนาเป็นมอดูลเมมเบรน

ในการนำเมมเบรนไปใช้งานจำเป็นต้องประกอบติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์เรียกว่า “มอดูล (Module)” ซึ่งมีหลายลักษณะ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) แบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound) และแบบท่อ (Tubular) โดยแต่ละแบบมีราคา ความหนาแน่นการบรรจุ (Packing density) การสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy consumption)

และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมการเกิดโพลาริเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization) และฟาวลิง (Membrane fouling) แตกต่างกัน [5] โดยมีมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวได้จากการม้วนแผ่นเมมเบรนรอบแกนกลางเจาะรูขนาดเล็ก สามารถพัฒนาขึ้นใช้เองได้ง่าย

งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซาน เพื่อใช้เป็นระบบบำบัดชั้นหลังสำหรับบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ โดยศึกษารูปแบบการม้วน (Configuration) แบบต่าง ๆ โดยมีสมมติฐานว่ามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่ได้จากการม้วนเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพสูงกว่ามอดูลที่ได้จากการม้วนเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซานเพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ โดยการศึกษาารูปแบบของการม้วนเมมเบรนแบบต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ใช้ของเสียจากคอกสุกรของบริษัท เอส.พี.เอ็ม. อาหารสัตว์ จำกัด จังหวัดราชบุรี นำมาเตรียมให้มีคุณภาพ เทียบเท่ากับน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพ อ้างอิงจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ เป็นน้ำเสียดิบในงานวิจัยนี้
- 2) ใช้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนไคโตซานในรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ เป็นระบบบำบัดชั้นหลังแทนระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

พลังงานทดแทน โดยทั่วไปหมายถึงพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ ซึ่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุโลกร้อน สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มาเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป เรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น ข้อมูลจากสารานุกรมวิกิพีเดีย [6] ระบุว่าในปี 2555 ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเพียง 18.2% ของพลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้าเพียง 1.8% โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์ และเชื้อเพลิงชีวภาพ เพิ่มขึ้น 23% แต่ตามแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน 10 ปี ระหว่าง 2555 – 2564 มีแผนที่จะให้มีการใช้พลังงานทดแทนเป็นสัดส่วน 20% ของพลังงานทั้งหมด นอกจากนั้นจากแผนยุทธศาสตร์ กระทรวงพลังงาน (พ.ศ.2555 – 2559) ในเป้าหมายของยุทธศาสตร์ที่ 3 ข้อ 3.2 ต้องการให้มีการใช้พลังงานทดแทนในระดับชุมชนอย่างทั่วถึง [1] กระทรวงพลังงาน โดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จึงกำหนดมาตรการจูงใจให้ผู้ประกอบการใน 3 กลุ่ม ได้แก่ ภาคบุคคล ภาคอุตสาหกรรม และภาคชุมชน ลงทุนก่อสร้างระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียและของเสีย เพื่อนำแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มาใช้เป็นพลังงานทดแทน ในรูปความร้อน และไฟฟ้า

แก๊สชีวภาพเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic process) โดยที่แก๊สชีวภาพจะมีแก๊สมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณ 50 – 80% นอกนั้นเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ไนโตรเจน (N_2), ไฮโดรเจน (H_2) อีกเล็กน้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการนี้แล้วให้แก๊สชีวภาพ คือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานเบียร์ โรงงานผลไม้กระป๋อง เป็นต้น รวมทั้งน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ จากกระบวนการดังกล่าวมี ค่าซีโอดี (COD) ลดลงมากกว่า 80% และได้แก๊สชีวภาพ 0.3 – 0.5 ลบ.ม./กิโลกรัม COD ที่ถูกกำจัด ทั้งนี้ขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท แก๊สมีเทนมีค่าความร้อน 39.4 เมกะจูล/ลบ.ม. สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 9.7 kWh [7]

ระบบผลิตแก๊สชีวภาพหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีรูปแบบหลัก 4 แบบ ได้แก่ระบบหมักแบบตัวกลางกรอง (Anaerobic Filter; AF) ระบบหมักแบบคอนแทค (Anaerobic Contact; AC) ระบบหมักแบบยูเอเอสบี (Anaerobic Upflow Sludge Blanket; UASB) และระบบหมักแบบฟลูอิดไรซ์ (Anaerobic Fluidized Bed; AFB)

ระบบหมักแบบยูเอเอสบี (UASB) เป็นระบบหมักที่ถูกพัฒนาในช่วงหลัง โดยอาศัยหลักการสร้างสภาวะในถังหมักให้เหมาะสม ทำให้แบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granular bacteria) สามารถเจริญเติบโตและมีปริมาณสูงในถังหมัก เม็ดแบคทีเรียนี้มีความหนาแน่นสูง และมีปริมาณเซลล์สูง จึงทำให้ระบบหมักนี้มีประสิทธิภาพสูง ระบบหมัก UASB นี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในช่วงหลังมากกว่าระบบหมักแบบอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีค่าก่อสร้างต่ำสุด เนื่องจากไม่ต้องการเครื่องกวนผสมและถังตกตะกอน และสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้สูง แต่อย่างไรก็ตามระบบหมัก UASB นี้มีข้อเสียคือมีความยุ่งยากในการเริ่มต้นเดินระบบ เนื่องจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพเป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์จำพวกที่ไม่ชอบออกซิเจน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในถังหมัก จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ แต่ยังมีวิธีการอื่น ๆ ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ ระบบสองขั้นตอน (Two – stage process) การควบคุมระบบหมักอุณหภูมิสูง (Thermophilic operation) ระบบผสม (Hybrid process) และการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียโดยการกรอง (Membrane filtration) โดยพบว่าการใช้ถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกัน โดยถังแรกเรียกว่า ถังหมักกรด ถังที่สองเรียกว่า ถังหมักมีเทน โดยให้ถังหมักกรดมีขนาด 20% ของถังหมักมีเทน ทำให้วิธีตามระบบสองขั้นตอนสามารถลดขนาดของถังหมักมีเทนได้ประมาณครึ่งหนึ่งหรือสามารถรับน้ำเสียได้สูงขึ้นอีกหนึ่งเท่าตัว ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน มีความต้องการสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแยกถังหมักเป็น 2 ถัง จึงทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่มีค่าซีโอดีปานกลางถึงสูง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมักจะถูกนำมาใช้เป็นระบบน้ำเสียขั้นต้น (Primary treatment) เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยก่อนบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพต่าง ๆ ซึ่งพบว่ายังสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนเป็นระบบบำบัดขั้นหลัง เพื่อให้มีคุณภาพสูงขึ้น แต่ข้อเสียของระบบนี้คือต้องการพลังงานในการเติมอากาศเข้าระบบ และต้องใช้พื้นที่ในการดำเนินระบบสูง เทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่อาจนำมาใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นหลังแทนระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน เพื่อให้ได้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในทุกภาคส่วนตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

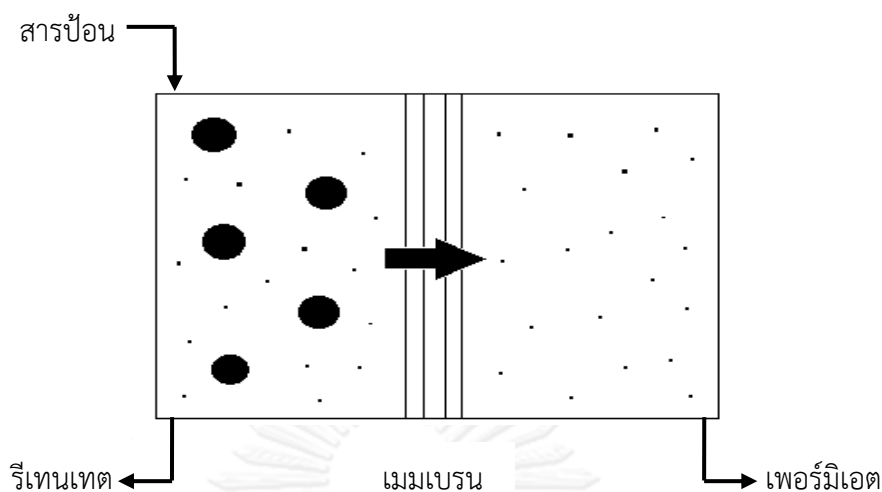
ตารางที่ 1 คุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ

	คุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ			มาตรฐานน้ำทิ้ง [3]
	สวพ. [8]	Lim และ คณะ [9]	Gonzalez และ คณะ [10]	
ซีโอดี (ก./ล.)	0.2 – 5	0.5 – 0.7	6.5 – 16.9	0.12 – 0.40
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	0.4 – 6	4.8 – 7.9	N/A	N/A
ของแข็งระเหยง่าย (ก./ล.)	0.1 – 3.7	3.2 – 5.9	2.7 – 8.8	N/A
ทีเคเอ็น (ก./ล.)	0.1 – 2	N/A	N/A	0.10 – 0.20
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ทั้งหมด (ก./ล.)	N/A	N/A	N/A	N/A
พีเอช	6.9 – 7.9	7.0±0.2	6.8 – 7.4	5.5 – 9.0

หมายเหตุ: มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดค่า TDS = 3.0 – 5.0 ก./ล., สารแขวนลอย = 0.05 – 0.15 ก./ล.

2.2 เทคโนโลยีเมมเบรน

เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นการแยกของแข็งแขวนลอยหรือของแข็งละลายออกจากของเหลวโดยใช้แรงขับ (Driving force) ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น แรงเคลื่อนไฟฟ้า เพื่อให้สารละลายผ่านแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ส่วนซึ่งไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปเรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) และส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) ดังรูปที่ 1 เมมเบรนที่ดีควรมีค่าฟลักซ์สูง ค่าการเลือกผ่านสูง มีความต้านทานต่อสารเคมีและความร้อน และมีความแข็งแรงเชิงกลสูง

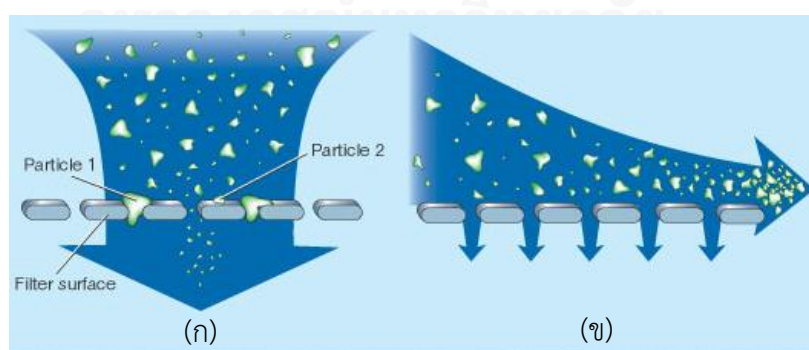


รูปที่ 1 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [5]

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนสามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของสารป้อน เป็น 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 2

1. การกรองแบบปิดตาย (Dead-end filtration) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่ไม่ผ่านรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง แต่จะทำให้ความสามารถในการกรองเพิ่มขึ้น การกรองลักษณะแบบนี้จะเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคไม่มาก

2. การกรองแบบไหลขวาง (Cross-flow filtration) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ขนานกับเมมเบรน หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอร์มิเอต การกรองลักษณะแบบนี้จะไม่เกิดการสะสมของอนุภาคบนพื้นผิวของเมมเบรน จึงเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูง นิยมใช้มากในระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 2 ลักษณะการไหลของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [11]

(ก) การกรองแบบปิดตาย (ข) การกรองแบบไหลขวาง

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่ใช้ความดัน (Pressure) เป็นแรงขับเคลื่อน แบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) และออสโมซิสผันทกลับ (Reverse osmosis, RO) ตามขนาดรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งทำให้มีความสามารถแยกขนาดอนุภาคได้แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2 และทำให้ต้องใช้แรงขับเคลื่อนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [5]

กระบวนการ	ขนาดอนุภาค	น้ำหนักโมเลกุล	แรงขับเคลื่อน
ไมโครฟิลเตรชัน	≥ 0.1 ไมครอน	$\geq 500,000$ ดอลตัน	15 – 500 กิโลพาสคัล
อัลตราฟิลเตรชัน	0.01-0.1 ไมครอน	1,000–500,000 ดอลตัน	200 – 1,400 กิโลพาสคัล
นาโนฟิลเตรชัน	0.001-0.01 ไมครอน	100-1,000 ดอลตัน	500 – 1,400 กิโลพาสคัล
ออสโมซิสผันทกลับ	≤ 0.001 ไมครอน	≤ 100 ดอลตัน	1,300 – 1,700 กิโลพาสคัล

การจำแนกชนิดของเมมเบรนสามารถแบ่งตามชนิดของโครงสร้าง และกลไกที่ใช้ในการแยกได้ 3 ประเภท ดังนี้ เมมเบรนสมมาตร (Symmetric membrane) เมมเบรนไม่สมมาตร (Asymmetric membrane) และเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange membrane)

1. เมมเบรนสมมาตร (Symmetric membrane) เป็นเมมเบรนที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอเหมือนกันตลอดชั้นความหนา สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1.1 เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (Dense membrane) เป็นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของเนื้อพอลิเมอร์สูง มีรูพรุนภายในเมมเบรนเล็กน้อยระดับอังสตรอม ไม่สามารถมองเห็นรูพรุนในเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เมมเบรนชนิดนี้สามารถแยกสารที่อยู่ในรูปของอะตอมหรือไอออนได้ เช่น ไอออนเกลือต่าง ๆ หรือไอออนโลหะในน้ำ ข้อเสียของเมมเบรนชนิดนี้คือมีค่าฟลักซ์ต่ำ ดังนั้นมีการทำให้เกิดโครงสร้างแบบไม่สมมาตรเพื่อทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น

1.2 เมมเบรนแบบรูพรุน (Porous membrane) เป็นเมมเบรนที่มีโครงสร้างรูพรุนเท่ากันตลอดชั้นความหนา การแยกเกิดขึ้นตามกลไกการคัดขนาด อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูของเมมเบรนก็จะถูกกักไว้ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูของเมมเบรนสามารถลอดผ่านเมมเบรนไปได้

2. เมมเบรนแบบไม่สมมาตร (Asymmetric membrane) เมมเบรนชนิดนี้มีโครงสร้างขนาดรูพรุนที่แต่ละระดับชั้นความหนาไม่เท่ากัน โดยเกิดการแยกบริเวณชั้นผิวของเมมเบรนเท่านั้น ส่วนโครงสร้างรูพรุนข้างใต้จะทำหน้าที่เป็นชั้นรองรับชั้นผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.1 เมมเบรนที่มีชั้นผิวและชั้นรองรับทำมาจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน เรียกว่า Loeb-Sourirajan asymmetric membrane ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ค้นพบวิธีการเตรียมโครงสร้างเมมเบรนลักษณะนี้ หรือเรียกสั้น ๆ ว่า เมมเบรนไม่สมมาตร (Asymmetric membrane)

2.2 เมมเบรนคอมโพสิต (Composite membrane) เป็นเมมเบรนที่ชั้นผิว และชั้นรองรับทำมาจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

3. เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน เป็นเมมเบรนที่ทำมาจากพอลิเมอร์ซึ่งมีกลุ่มฟังก์ชัน (Functional group) ที่มีประจุ จึงทำให้มีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ โดยผลึกไอออนในสารป้อนที่เหมือนกับประจุของกลุ่มฟังก์ชันในเมมเบรนให้ห่างออกไปแต่ยอมให้ไอออนที่ต่างจากประจุของกลุ่มฟังก์ชันในเมมเบรนผ่านเมมเบรนไปได้ เมมเบรนชนิดนี้อาจเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่นหรือแบบรูพรุนก็ได้

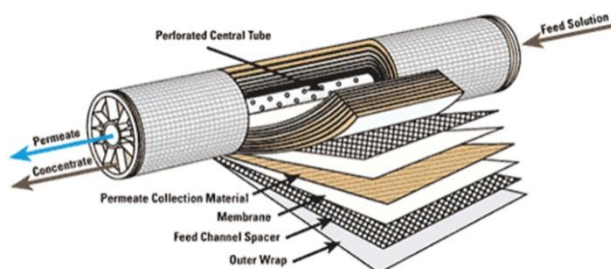
การจำแนกชนิดของเมมเบรนอีกลักษณะหนึ่ง คือ การแบ่งตามสมบัติความชอบน้ำ เป็นเมมเบรนชอบน้ำ (Hydrophilic membrane) และเมมเบรนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic membrane) การนำเมมเบรนไปใช้งานด้านการบำบัดน้ำเสีย ควรเลือกใช้เมมเบรนชนิดชอบน้ำ เพราะให้ฟลักซ์น้ำสูงกว่าเมมเบรนไม่ชอบน้ำ นอกจากนั้นการใช้เมมเบรนไม่ชอบน้ำ ยังมีปัญหาของการเกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ง่าย ทำให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพต่ำลง

การนำเมมเบรนไปใช้งานต้องประกอบติดตั้งในอุปกรณ์ที่เรียกว่า มอดูล (Module) มอดูลมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) แบบท่อ (Tubular) และแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound) โดยแต่ละแบบมีราคา ความหนาแน่นการบรรจุ (Packing density) การสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy consumption) การควบคุมการเกิดโพลาไรเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization) และการเกิดความสกปรกของผิวเมมเบรนหรือฟาวลิง (Membrane fouling) แตกต่างกัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบมอดูลเมมเบรน [5]

	แบบแผ่นและกรอบ	แบบเส้นใยกลวง		แบบม้วนเป็นเกลียว	แบบท่อ	
		หยาบ	ละเอียด		ราคาสูง	ราคาต่ำ
ความหนาแน่นของเมมเบรน	ปานกลาง	ปานกลาง	สูงมาก	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ค่าการลงทุน	สูง	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
แนวโน้มการเกิดฟาวลิง	ปานกลาง	ต่ำ	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
ความสามารถในการทำความสะอาด	ดี	ต่ำ	ไม่ได้	ดี	ดี	ดี
ราคาแปรผัน	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ปริมาณการไหล	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง

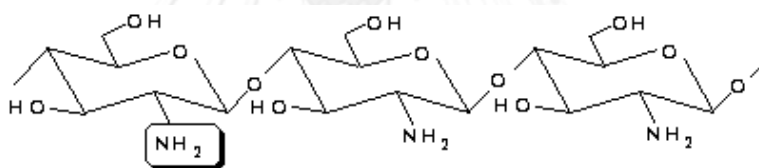
ในงานวิจัยนี้เลือกพัฒนามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module) มีลักษณะดังรูปที่ 3 เนื่องจากเตรียมขึ้นได้ง่ายโดยการม้วนแผ่นเมมเบรนรอบแกนกลางเจาะรู ซึ่งเป็นที่รวมสารเพอร์มิเอตไหลออกจากมอดูล



รูปที่ 3 ลักษณะของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว [12]

2.3 เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane)

ไคโตซานเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่สกัดได้จากเปลือกนอกของกุ้ง หอย และปู ในโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่อะมิโน (-NH₂) ซึ่งทั้งสองหมู่นี้ทำให้เมมเบรนไคโตซานมีสมบัติความชอบน้ำสูง จึงน่าจะมีความเหมาะสมในการนำเมมเบรนไคโตซานมาพัฒนาเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวใช้ในการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [13]

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sairam และคณะ [14] รายงานการเตรียมเมมเบรนผิวหนาโนฟิลเตรชันของพอลิอะนิลีน (PANI) ไม่สมมาตรบนผ้าไม่ถักไม่ทอ (Non woven backing) ด้วยวิธีเฟสอินเวอร์ชัน เพื่อนำมาเตรียมมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module) 3 แบบ (M1, M2 และ M3) เมมเบรนพอลิอะนิลีนในมอดูล M1 และ M2 ได้รับการเชื่อมขวางทางเคมีในระดับต่างกันด้วยสารละลายกลูทาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) แต่ขึ้นรูปเป็นเมมเบรน (Cast) บนผ้าไม่ถักไม่ทอทำด้วยพอลิพอพิลีนเหมือนกัน มอดูล M3 ได้จากการขึ้นรูปเป็นเมมเบรนของสารละลายพอลิอะนิลีนบนผ้าไม่ถักไม่ทอทำด้วยพอลิเอสเทอร์แล้วเชื่อมขวางด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มอดูลที่ม้วนเสร็จแล้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 นิ้ว ทดสอบความสามารถในการกรองของมอดูลทั้งสามกับตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ อะซิโตน เททราไฮโดรฟูแรน และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พบว่า เมมเบรนพอลิอะนิลีนที่เตรียมได้มีค่า Molecular weight cutoff (น้ำหนักโมเลกุลของสารทดสอบที่ถูกเมมเบรนกักกัน 90-95%) ที่อุณหภูมิ 30 องศา

เซลเซียส ระหว่าง 150–300 กรัม/โมล มอดูลมีเสถียรภาพในการทำงานที่อุณหภูมิสูงจนถึง 65 องศาเซลเซียส แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ นอกจากนี้พบว่ามอดูลทั้ง 3 แบบยังคงมีความสามารถในการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน ถึงแม้มอดูลจะถูกทำให้แห้ง จึงไม่จำเป็นต้องมีการรักษาสภาพมอดูลในสารรักษาสภาพ (Conditioning or preservative agents)

Belkhouche และคณะ [15] ศึกษาประสิทธิภาพการกักกันซิงค์ไอออนในน้ำชะมูลฝอย (Leachate solution) ของขยะอุตสาหกรรม โดยใช้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวของเมมเบรน Nanomax-50 จากบริษัท Millipore ซึ่งเป็นเมมเบรนคอมพอสิตที่มีชั้นผิวประจุลบทำด้วยพอลิเอไมด์อะริลีน (Polyamide arylene) หนา 0.1 ถึง 0.5 ไมครอน บนตัวรองรับพอลิซัลโฟน (Polysulfone) เมมเบรนคอมพอสิตมีค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 350 ดอลตัน มีพื้นที่ของการกรองเท่ากับ 0.37 ตารางเมตร พบว่าที่ pH เท่ากับ 5 ซิงค์ไอออน 99.99% อยู่ในรูปของ Zn^{2+} ค่าความสามารถการแพร่ผ่านเมมเบรน (Hydraulic permeability) จากการใช้น้ำบริสุทธิ์ เท่ากับ 2.71×10^{-6} เมตร/วินาที-บาร์ เมื่อเปลี่ยนใช้สารละลายซิงค์ไอออนในช่วงความเข้มข้น 3.99 – 559 พีพีเอ็ม ที่ความดันไม่เกิน 7.5 บาร์ เมมเบรนยังคงให้ค่าความสามารถการแพร่ผ่านเมมเบรนเท่ากับน้ำบริสุทธิ์ แสดงว่าซิงค์ไอออนถูกผลักออกจากผิวหน้าของเมมเบรน แต่เมื่อใช้ความดันมากกว่า 7.5 บาร์ จะเกิดโพลาไรเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization) ของซิงค์ไอออน ทำให้เกิดการเป็ยงเบนของค่าความสามารถการแพร่ผ่านเมมเบรนแตกต่างจากค่าที่ได้จากน้ำบริสุทธิ์

Qiu และคณะ [16] เตรียมเมมเบรนคอมพอสิตของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บนสั๊กหลาดโลหะ (Felt metal) ด้วยวิธีเฟสอินเวอร์ชันแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ได้เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อใช้แยกอิมัลชันของน้ำมันกับน้ำ พบว่าเพอร์มิเอตพลักซ์เพิ่มขึ้นตามแรงขับดันที่เพิ่มขึ้น ในช่วงที่ศึกษา 0.2 ถึง 0.4 เมกะพาสคัล โดยได้พลักซ์เพิ่มขึ้นตามความเร็วแนวขวาง (Cross-flow velocity) ที่เพิ่มขึ้น แต่ลดลงตามความเข้มข้นของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ได้ค่าการกักกันน้ำมันมากกว่า 90% ในช่วงความเข้มข้นของน้ำมัน 0.05% ถึง 0.50% ที่แรงดัน 0.3 เมกะพาสคัล เมมเบรนเกิดฟาวลิง (Fouling) อย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 นาที และการใช้คลื่นเหนือเสียง (Ultrasound) เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการขจัดน้ำมันที่ติดบนเมมเบรน

Zhu และคณะ [13] เตรียมเมมเบรนคอมพอสิตของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับไคโตซานบนตัวรองรับเซรามิกแบบทอของ ZrO_2/Al_2O_3 ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip coating method) แล้วเชื่อมขวางด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะการดึงน้ำออกจากของผสมอินทรีย์กับน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แควอเรชัน พบว่าขนาดรูของตัวรองรับเซรามิกที่เหมาะสมคือ 0.2 ไมครอน การเพิ่มสัดส่วนของไคโตซานทำให้เพอร์มิเอตพลักซ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยไม่ทำให้ค่าแฟกเตอร์การแยก (Separation factor) เสียไป และในการทดสอบการดึงน้ำออกจากสารละลายน้ำของเอสเทอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอทิลแอสซิเตตที่มีปริมาณน้ำ 3.5% โดยน้ำหนัก ได้พลักซ์สูงถึง 1,250 กรัม/ตร.ม.-ชม และค่าแฟกเตอร์การแยกมากกว่า 10,000

Mierzwa และคณะ [17] ศึกษาการใช้มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวระดับอัลตราฟิลเตรชัน GK-4040F ของบริษัท Osmonics ซึ่งมีค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 3,500 กรัม/โมล บำบัด

น้ำในอ่างเก็บน้ำของเขตเมืองหลวง São Paulo ประเทศบราซิล เพื่อใช้เป็นน้ำดื่ม เก็บข้อมูลเป็นเวลา 3,400 ชั่วโมง พบว่าระบบให้เพอร์มิเอตฟลักซ์เฉลี่ย 19.7 ลิตร/ตร.ม.-ชม. ที่แรงขับเคลื่อนเท่ากับ 467 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon; TOC) และความขุ่นได้ 85% และ 95% ตามลำดับ

Reimann และคณะ [18] เปรียบเทียบผลการใช้เมมเบรนอินทรีย์ของ PS-50,000 (ค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 50,000 กรัม/โมล) และ PES-40,000 (ค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 40,000 กรัม/โมล) กับเมมเบรนอินทรีย์ SiC-0.05 (ค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 0.05 ไมครอน), SiC-0.2 (ค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 0.2 ไมครอน) และ Al_2O_3 -0.1 (ค่า Molecular weight cutoff เท่ากับ 0.1 ไมครอน) ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันกับน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรมหลายชนิด ได้แก่ น้ำล้างมันฝรั่งและแครอท ปฏิกุลสุกร ปฏิกุลวัว และน้ำเสียจากโรงรีดนม พบว่า เมมเบรนอินทรีย์ SiC-0.05 ให้เพอร์มิเอตฟลักซ์สูงสุด และค่าการกักกันซีไอดี (COD) ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรน SiC-0.05 กับเมมเบรน SiC-0.2 พบว่าเมมเบรน SiC-0.05 ให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าการกักกัน COD สูงกว่า ไม่มีความแตกต่างของค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าการกักกัน COD ระหว่างเมมเบรน Al_2O_3 -0.1 กับเมมเบรน SiC-0.05

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุประสงค์

1. เมมเบรนไคโตซาน 3 ชนิด ได้แก่ เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์และมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ซึ่งมีลักษณะสมบัติแสดงผลการศึกษาในบทที่ 4

2. ของเสียจากคอกสุกรของบริษัท เอส.พี.เอ็ม. อาหารสัตว์ จำกัด จังหวัดราชบุรี เก็บรักษาที่ อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี

3.2 ชุดทดสอบมอดูลเมมเบรน

1. ชุดทดสอบมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module)
2. ปั๊มแรงดันสูง (High pressure pump)
3. ชุดทดสอบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ (Plate & frame module)

3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

1. เครื่องทดสอบ Universal Testing: LLOYD Instruments LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่อง Scanning Electron Microscopy: JEOL รุ่น JSM-6480 LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่องทดสอบ Contact angle: Rame-hart 200F1 (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. Total organic carbon analyzer (TOC): Shimadzu รุ่น TOC Tcvh (ศูนย์ความเป็นเลิศ ด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน

3.4.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาภาคตัดขวางของเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2 การศึกษาความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด (% Elongation) ของเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง และไม่เชื่อมขวาง ตามมาตรฐาน ASTM D882 (Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting) และจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19] พบว่าควรทำการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอลสิต ตามมาตรฐาน ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบกับแผ่นพลาสติกทั้งชนิดที่ไม่มีการเสริมแรง (Unreinforced plastics) หรือมีการเสริมแรง (Reinforced plastics) ที่มีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร จนถึง 14 มิลลิเมตร ดังนี้

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882

1. ตัดเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นให้มีขนาด 5×150 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 (ก)
2. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
3. ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ดังรูปที่ 5 (ข) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

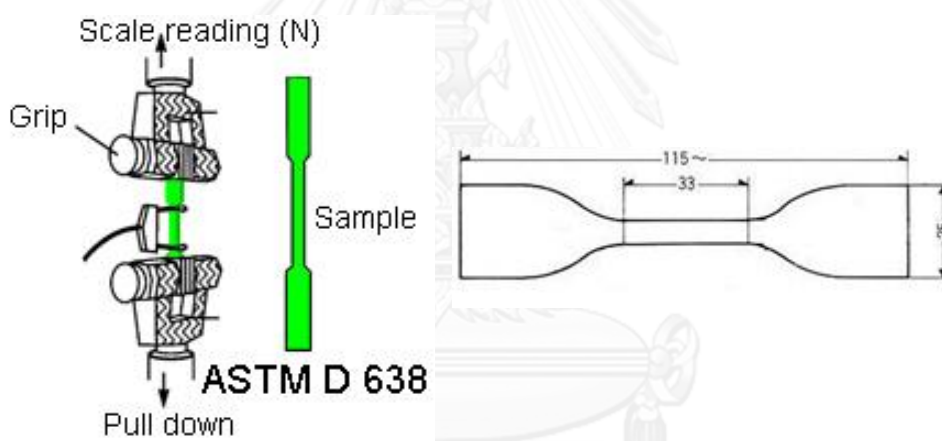
- ก) ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที
- ข) ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- ค) ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) เท่ากับ 100 นิวตัน

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ใช้สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับมาตรฐาน ASTM D882 แต่ตัดเมมเบรนเป็นรูปดัมเบลล์มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 6



(ก) แผ่นเมมเบรนที่นำมาทดสอบ (ข) เครื่อง Universal testing machine

รูปที่ 5 เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5K



รูปที่ 6 ลักษณะและขนาดที่ใช้ทดสอบเมมเบรนแบบคอมพอสิต

3.4.3 การศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรน (Hydrophilicity)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรน จากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) และค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ (Pure water permeability) โดยวัดค่ามุมสัมผัสด้วยวิธี Static sessile drop method ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเมมเบรนกับเส้นสัมผัสหยดน้ำ ณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งเท่ากับค่าความชันของกราฟพล็อตระหว่างค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์กับความดัน มีวิธีการศึกษาดังนี้

1. ตัดเมมเบรนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร วางบนผิวหน้าแปลนของมอดูลแบบแผ่นและกรอบ ดังรูปที่ 7

2. ป้อนน้ำบริสุทธิ์เข้าไปใน Membrane cell
3. ควบคุมแรงดันทางสารป้อน (P) ที่ระดับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ส่วนความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับความดันบรรยากาศ
4. รอจนได้ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนคงที่ (Steady state)
5. จับเวลาที่น้ำซึมผ่านเมมเบรน (น้ำเพอร์มิเอต) คำนวณค่าฟลักซ์ตามสมการที่ (3.1)
6. เปลี่ยนเมมเบรนแผ่นใหม่ และควบคุมแรงดันด้านสารป้อนเป็น 200 และ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ จับเวลาวัดปริมาณน้ำเพอร์มิเอตที่แต่ละแรงดัน เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์ตามสมการที่ (3.1)
7. พล็อตกราฟระหว่างค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ (J) กับความดัน (P)

$$J = \frac{Q}{A\Delta t}$$

(3.1)

เมื่อ

- J = ฟลักซ์ (ลบ.ซม.ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
 Q = ปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (ลบ.ซม.)
 A = พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ตารางเมตร)
 Δt = เวลาที่เก็บเพอร์มิเอต (ชั่วโมง)



หน้าแปลนของมอดูล
แบบแผ่นและกรอบ

รูปที่ 7 ชุดทดสอบมอดูลแบบแผ่นและกรอบ

3.4.4 การศึกษาหาขนาดรูพรุนเมมเบรน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาหาขนาดรูพรุนเมมเบรนจากค่า Molecular weight cutoff (MWCO) โดยทดสอบหาค่าร้อยละการกักกันของสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ด้วยมอดูลแบบแผ่นและกรอบ ดังนี้

1. เตรียมสารละลาย PEG ในน้ำให้มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร จากสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กัน คือ 200, 550, 1,000, 2,500 และ 5,000 ดอลตัน ดังตัวอย่างแสดงการเตรียมสารละลายในภาคผนวก ข

2. วิเคราะห์ความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของสารละลายป้อน PEG ในหน่วย มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยเครื่อง TOC

3. ควบคุมแรงดันด้านสารป้อนเป็น 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

4. รอจนได้ปริมาณเพอร์มิเอตที่ซึมผ่านเมมเบรนคงที่

5. วิเคราะห์ความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างเพอร์มิเอตด้วยเครื่อง TOC

6. คำนวณค่าร้อยละการกักกันสาร (%R) ตามสมการ (3.2)

7. เปลี่ยนสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอื่นต่อไป และดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 ข้างต้น

8. พล็อตค่าร้อยละการกักกันสารที่แต่ละน้ำหนักโมเลกุลของสารละลายป้อน PEG ค่า MWCO ของเมมเบรน คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกกักกันได้ร้อยละ 90 – 95%

$$\%R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอร์มิเอต (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_f = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารป้อน (มิลลิกรัม/ลิตร)

3.5 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ

ในงานวิจัยนี้เตรียมน้ำเสียดิบโดยการนำมูลสุกรมาละลายน้ำให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับคุณภาพน้ำที่ปล่อยออกจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ [8] (ซีไอดี 0.2 – 5 ก./ล., ของแข็งทั้งหมด 0.4 – 6 ก./ล., ของแข็งระเหยง่าย 0.1 – 3.7 ก./ล. และค่าพีเอช 6.9 – 7.9) ดังแสดงวิธีการเตรียมในภาคผนวก ข ศึกษาคุณภาพของน้ำเสียดิบและน้ำผ่านมอดูลเมมเบรน ตามวิธีการมาตรฐาน (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater) [20] ได้แก่พารามิเตอร์ ดังนี้

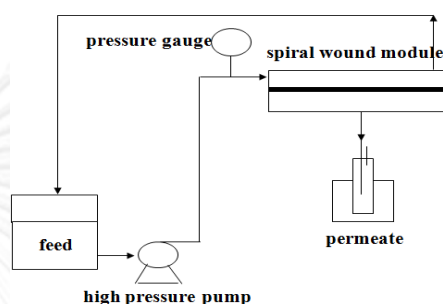
1. ค่าพีเอช
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)
3. ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatiles solids, VS)
4. ค่าซีไอดี (COD)
5. ปริมาณเจลดาร์ลไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN)
6. ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)

3.6 การทดลองมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวได้จากการม้วนเมมเบรนที่มีความยาวตามกำหนดรอบท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.7 ซม. ซึ่งใช้เป็นแกนกลางของมอดูลและมีการเจาะรูบริเวณ กลางท่อเพื่อให้น้ำเพอร์มิเอตผ่านเมมเบรนไหลออกจากมอดูล ประกอบมอดูลเข้าไปในปลอกของ มอดูล ดังรูปที่ 8 (ก) ต่อมอดูลเข้ากับกับองค์ประกอบอื่น ๆ มีแผนผังชุดการทดลองดังรูปที่ 8 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 มอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวและแผนผังชุดการทดลอง

ศึกษารูปแบบของการม้วนเมมเบรนแบบต่าง ๆ ต่อการบำบัดน้ำเสีย โดยมีขั้นตอน การศึกษา ดังนี้

1. ในการศึกษาผลของจำนวนรอบ
 - 1.1 ม้วนเมมเบรนไคโตซาน 3 แบบ (แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง, แบบเนื้อแน่นมี การเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์มีการเชื่อมขวาง) ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 20 ซม., 60 ซม. และ 100 ซม. (ทีละชนิดและทีละขนาด) รอบแกนกลางเจาะรู
 - 1.2 หาค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว ในข้อ 1 ตามวิธีการเช่นเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.3 แต่ใช้ความดันด้านสารป้อน เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
 - 1.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวในข้อ 1 ณ แรงดันด้านสารป้อนเท่ากับ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยเปรียบเทียบคุณภาพน้ำ ก่อนและหลังการบำบัด
2. ในการศึกษาผลของการใช้สแปเซอร์ (Spacer)
 - 2.1 ใช้ผ้าสปันปอนด์ และตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก เป็น Spacer
 - 2.2 แทรก Spacer ยาว 20 ซม. (ทีละชนิด) บริเวณกลางแผ่นเมมเบรนไคโตซาน 2 แบบ (แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง) ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 20 ซม., 60 ซม. และ 100 ซม. (ทีละชนิดและทีละขนาด)

แล้วม้วนรอบแกนกลางเจาะรูไปพร้อมกัน หาค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำ
บริสุทธิ์ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียตามข้อ 1 ข้างต้น

2.3 เพื่อศึกษาผลของความยาวของ Spacer ให้ม้วน Spacer ชนิดที่ให้ผลดีจาก
ข้อ 2.2 แต่ใช้ความยาว 3 ขนาด คือ 20 ซม., 60 ซม. และ 100 ซม. เข้ากับ
เมมเบรนไคโตซานชนิดที่ให้ผลดีจากข้อ 2.2 หาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียตาม
ข้อ 1 ข้างต้น

3. ในการศึกษาอายุการใช้งานของมอดูล ใช้มอดูลที่ให้ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด
ที่ดีที่สุดข้อ 2 ข้างต้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

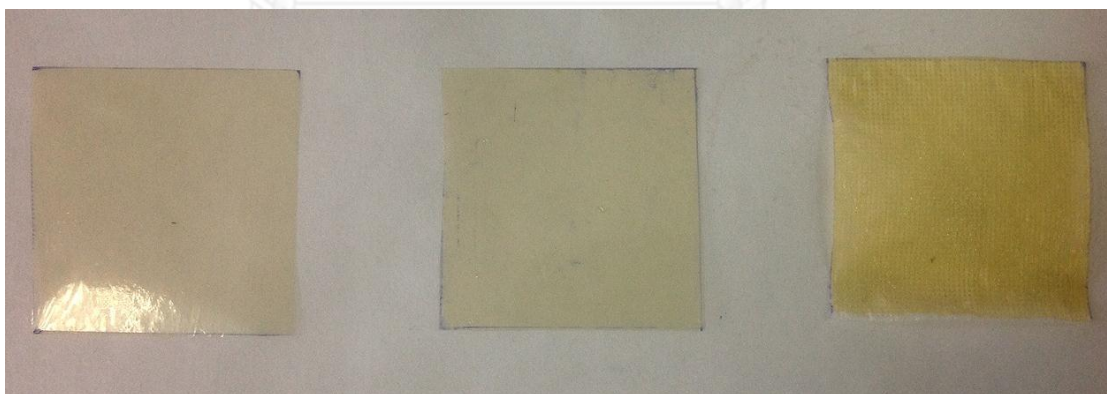
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสมบัติของเมมเบรนไคโตซาน

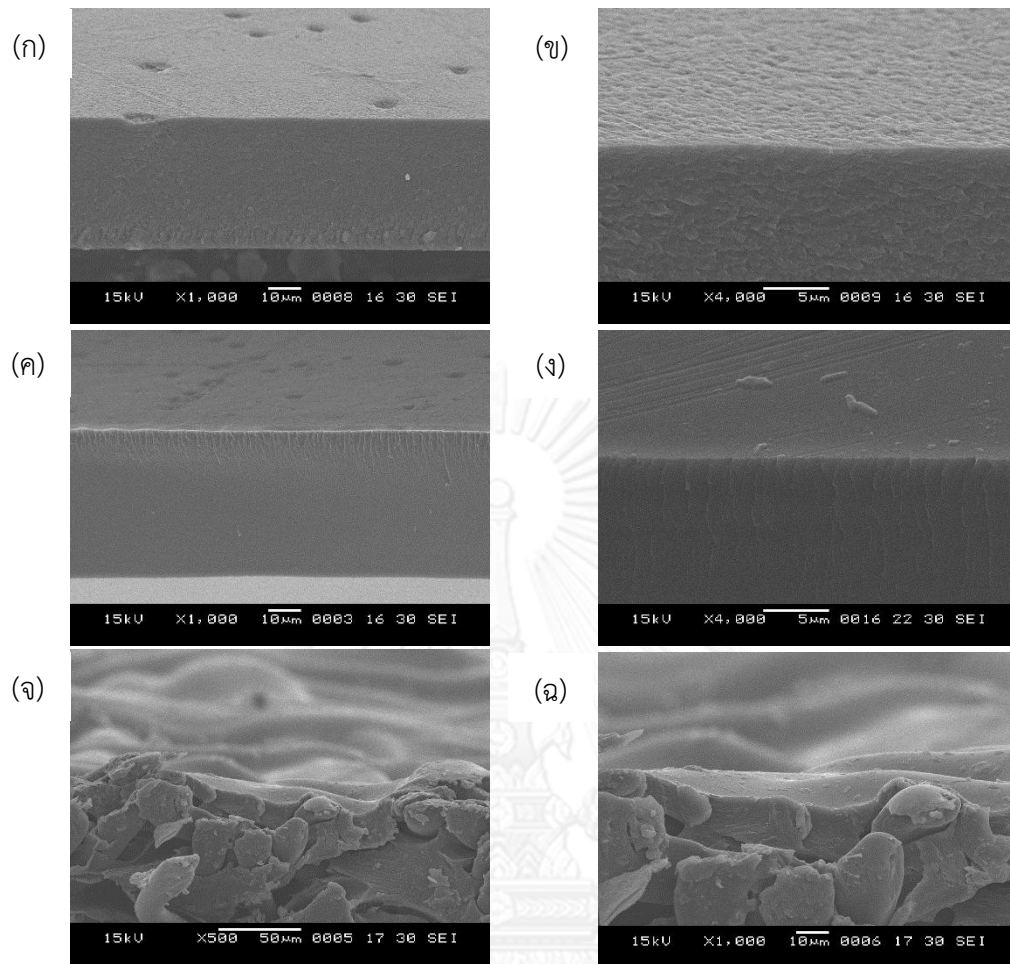
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐาน

เมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มี 3 แบบ คือ แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันบอนด์มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก มีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 9 โดยแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวางมีสีเหลืองชุ่น แต่แบบเนื้อแน่นเชื่อมขวางมีสีเหลืองโปร่งใส ผิวเนียนลื่นกว่าแบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง เมื่อพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 10 พบว่าไม่เห็นรูพรุนในเมมเบรนแบบเนื้อแน่นทั้งที่ไม่มีการเชื่อมขวาง และมีการเชื่อมขวาง ทั้งที่กำลังขยาย 1000 และ 4000 เท่า แต่ในแบบมีการเชื่อมขวางเห็นการอัดแน่นของโครงสร้างมากกว่า ในส่วนของเมมเบรนแบบคอมพอสิต ดังรูปที่ 10 (จ และ ฉ) เห็นว่ามีชั้นเนื้อเมมเบรนไคโตซานบาง ๆ เคลือบเป็นผิวอยู่บนโครงสร้างเส้นใยของผ้าสปันบอนด์ตามต้องการทางทฤษฎี และมีบางส่วนซึมเข้าไปอยู่ระหว่างเส้นใยด้วย ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจเป็นข้อเสียทำให้ฟลักซ์ลดลง แต่อาจเป็นข้อดีทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไม่ต่ำมากนัก



รูปที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนไคโตซาน

(ก) แบบไม่เชื่อมขวาง (ข) แบบมีการเชื่อมขวาง (ค) แบบคอมพอสิต



รูปที่ 10 ภาพภาคตัดขวาง SEM ของเมมเบรนไคโตซาน

- (ก) เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า
- (ข) เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า
- (ค) เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบมีการเชื่อมขวาง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า
- (ง) เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบมีการเชื่อมขวาง ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า
- (จ) เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต ที่กำลังขยาย 500 เท่า
- (ฉ) เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.1.2 ผลการศึกษาความสามารถทนต่อแรงดึง

ความหนาของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง แบบมีการเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 49.5 ± 16.6 , 60.0 ± 12.5 และ 152.0 ± 10.3 ไมครอน ตามลำดับ ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 ของเมมเบรนทั้ง 3 แบบ มีค่าเท่ากับ 69.8 ± 3.5 , 73.1 ± 0.9 และ 12.6 ± 0.8 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เห็นได้ว่าคุณสมบัติความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมพอสิตเมื่อวัดตามมาตรฐาน ASTM D882 มีค่าต่ำเกินไป เป็นไปไม่ได้ เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ได้ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงเท่ากับ 46.4 ± 0.4 , 48.4 ± 2.1 และ 52.5 ± 0.4 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 ซึ่งมีความสมเหตุสมผลมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19] และเป็นวิธีการทดสอบกับผ้าสปันปอนด์เชิงพาณิชย์หลาย ๆ แห่่ง เช่น PolyMirae Moplen HP562S Fiber (Spunbond) [21] หรือ Moplen HP562T [22] เป็นต้น เนื่องจากเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตมีผ้าสปันปอนด์เป็นตัวรองรับ จึงส่งผลให้เมมเบรนมีความแข็งแรงมากกว่าและยืดได้มากกว่าเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวาง

ตารางที่ 4 ความสามารถทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืดของเมมเบรนไคโตซาน

เมมเบรน	ความหนา (μm)	ASTM D882		ASTM D638	
		ความทนต่อแรงดึง (MPa)	%การยืด	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	%การยืด
ไม่เชื่อมขวาง	49.5 ± 16.6	69.8 ± 3.5	8.6 ± 1.5	46.4 ± 0.4	7.0 ± 4.3
เชื่อมขวาง	60.0 ± 12.5	73.1 ± 0.9	7.9 ± 1.5	48.4 ± 2.1	3.2 ± 0.0
คอมพอสิต	152.0 ± 10.3	12.6 ± 0.8	18.2 ± 1.0	52.5 ± 0.4	14.7 ± 3.2

หมายเหตุ : ความหนาของผ้าสปันปอนด์ = 131.5 ± 15.8 ไมครอน

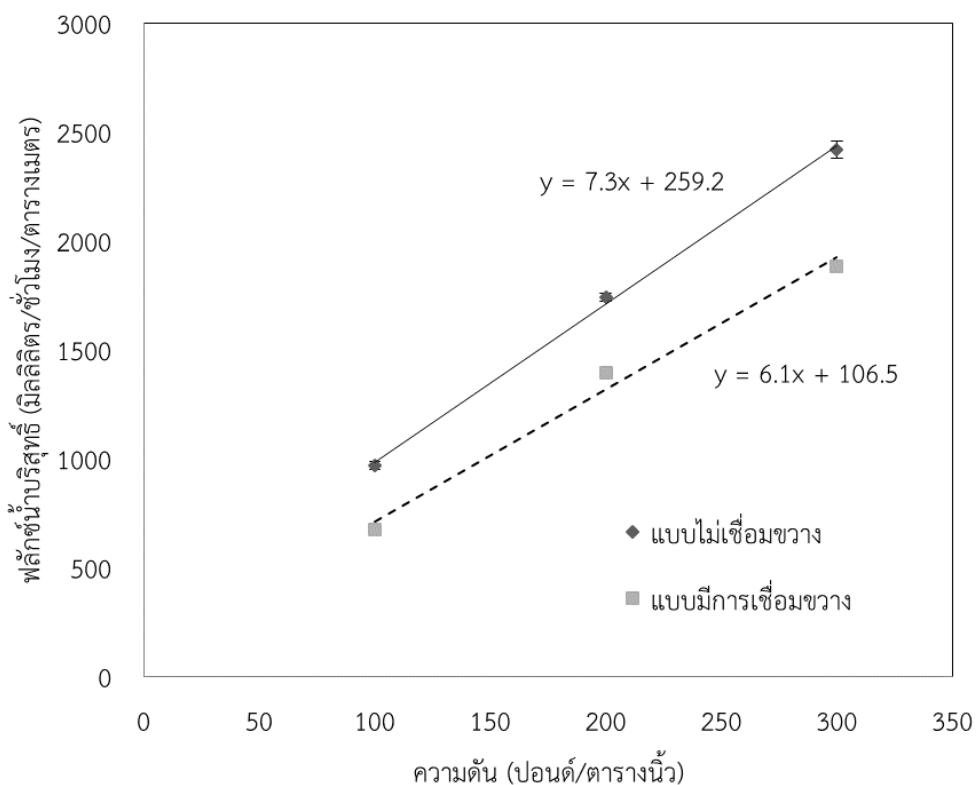
4.1.3 ผลการทดสอบความชอบน้ำ

ผลการทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 3 ชนิด จากค่ามุมสัมผัส ดังตารางที่ 5 พบว่าลำดับความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซานเรียงจากมากไปน้อย คือ แบบคอมพอสิต > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 5 ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซาน

ชนิดของเมมเบรนไคโตซาน	ค่ามุมสัมผัส	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวเมมเบรน
แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง	78.32 ± 1.29	
แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง	95.14 ± 1.42	
แบบคอมพอสิต	65.80 ± 2.73	

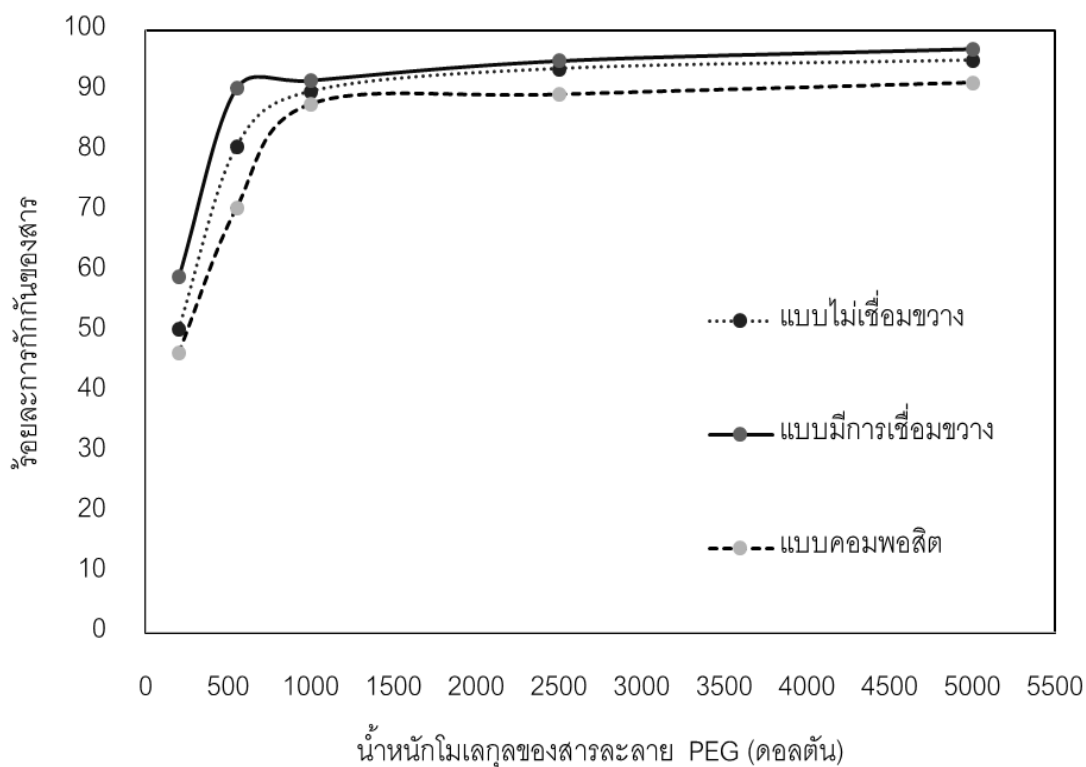
ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งได้จากความชันของกราฟพล็อตระหว่างค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ (ลบ. ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร) กับ ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ของเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 11 มีค่าเท่ากับ 7.3 และ 6.1 ลบ. ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ แสดงว่า เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวางมีความชอบน้ำมากกว่าแบบมีการเชื่อมขวาง สอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสในส่วนของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต พบว่า ไม่ต้องใช้แรงดัน ก็สามารถได้น้ำเพอร์มิเอตแพร่ผ่านเมมเบรนออกมา แสดงว่าค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตเท่ากับ ∞ (Infinity)



รูปที่ 11 สมบัติความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซาน

4.1.4 ผลการทดสอบค่า Molecular weight cutoff (MWCO)

ค่า MWCO มีนิยามหมายถึงน้ำหนักโมเลกุลมีหน่วยเป็นดอลตัน (Dalton) ของโมเลกุลสารซึ่งถูกกักไว้ด้วยเมมเบรนได้อย่างน้อยร้อยละ 90 มักใช้เป็นพารามิเตอร์บอกขนาดรูพรุนของเมมเบรนประเภท Ultrafiltration และ Microfiltration ถึงแม้ไม่เหมาะกับการบอกขนาดรูพรุนของเมมเบรนเนื้อแน่น แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบหาเพื่อใช้วิเคราะห์ประกอบกับภาพ SEM ที่ได้ ซึ่งพบว่า ค่า MWCO ของเมมเบรนเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง เมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง และแบบคอมพอสิต ดังรูปที่ 12 เท่ากับ 1000, 500 และ 5000 ดอลตัน ตามลำดับ จากผลดังกล่าวเป็นการยืนยันว่าเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวางมีโครงสร้างอัดแน่นที่สุด เนื่องจากพันธะการเชื่อมขวางของกรดซัลฟิวริก สอดคล้องกับผลการศึกษาด้วย SEM และความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ นอกจากนั้นขนาดรูพรุนของเมมเบรนทั้ง 3 แบบ จากค่า MWCO ข้างต้น เทียบเท่ากับเมมเบรน ประเภท Nanofiltration, Nanofiltration ถึง Reverse osmosis และ Nanofiltration ถึง Ultrafiltration ตามลำดับ



รูปที่ 12 กราฟ MWCO ของเมมเบรนไคโตซานจากค่าร้อยละการกักกันสารละลาย PEG

4.2 คุณภาพน้ำเสียดิบ

คุณภาพน้ำเสียดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 6 อยู่ในช่วงค่าสูงของน้ำทิ้งจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ งานวิจัยนี้มีเหตุผลในการอ้างอิงกับสถาบันฯ เนื่องจากเป็นสถาบันที่ได้ดำเนินการระบบแก๊สชีวภาพใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ตั้งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 ต่อเนื่องมาจวบจนปัจจุบัน มีประสบการณ์ในการเดินระบบอย่างมาก แต่พบว่าคุณภาพน้ำโดยเฉพาะช่วงค่าสูงยังคงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ยืนยันว่าควรต้องมีระบบบำบัดขั้นหลังต่อจากระบบบ่อหมักแก๊สชีวภาพ

ตารางที่ 6 คุณภาพน้ำเสียดิบ

	น้ำเสียดิบงานวิจัยนี้	น้ำทิ้งจากบ่อหมัก แก๊สชีวภาพ [8]	มาตรฐานน้ำทิ้ง [3]
ซีโอดี (ก./ล.)	4.0±0.2	0.2 – 5	0.12 – 0.40
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	5.0±0.2	0.4 – 6	N/A
ของแข็งระเหยง่าย (ก./ล.)	3.6±0.1	0.1 – 3.7	N/A
ทีเคเอ็น (ก./ล.)	1.8±0.0	0.1 – 2	0.10 – 0.20
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ทั้งหมด (ก./ล.)	94.1±0.8	N/A	N/A
พีเอช	7.9±0.0	6.9 – 7.9	5.5 – 9.0

หมายเหตุ: มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดค่า TDS = 3.0 – 5.0 ก./ล., สารแขวนลอย = 0.05 – 0.15 ก./ล.

4.3 ผลการศึกษาמודูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบไม่มี Spacer

4.3.1 สมบัติความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล

ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่เตรียมจากเมมเบรนความยาวเท่ากับ 100, 60 และ 20 ซม. ของแบบไม่เชื่อมขวาง มีค่าเท่ากับ 0.4, 1.3 และ 4.4 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ของแบบมีการเชื่อมขวาง มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.4 และ 2.2 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ และของแบบคอมพอสิตมีค่าเท่ากับ 6.6, 12.4 และ 207.7 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ดังตารางที่ 7 แสดงว่าลำดับความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซานเรียงจากมากไปน้อย คือ แบบคอมพอสิต > แบบเนื้อแน่นไม่เชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง สอดคล้องกับการทดสอบด้วยมอดูลแบบแผ่นและกรอบในหัวข้อ 4.1.3 ข้างต้น เพียงแต่ตัวเลขไม่เท่ากัน นอกจากนั้นยัง

พบว่าความยาวหรือจำนวนรอบของการม้วนเมมเบรนมากขึ้นในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวทำให้ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำลดลง ซึ่งหมายถึงการจะได้ฟลักซ์น้ำลดลง

ตารางที่ 7 ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ความยาวของ เมมเบรน (ซม.)	ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		
	ไม่เชื่อมขวาง	เชื่อมขวาง	คอมพอสิต
20	4.4	2.2	207.7
60	1.3	0.4	12.4
100	0.4	0.1	6.6

4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

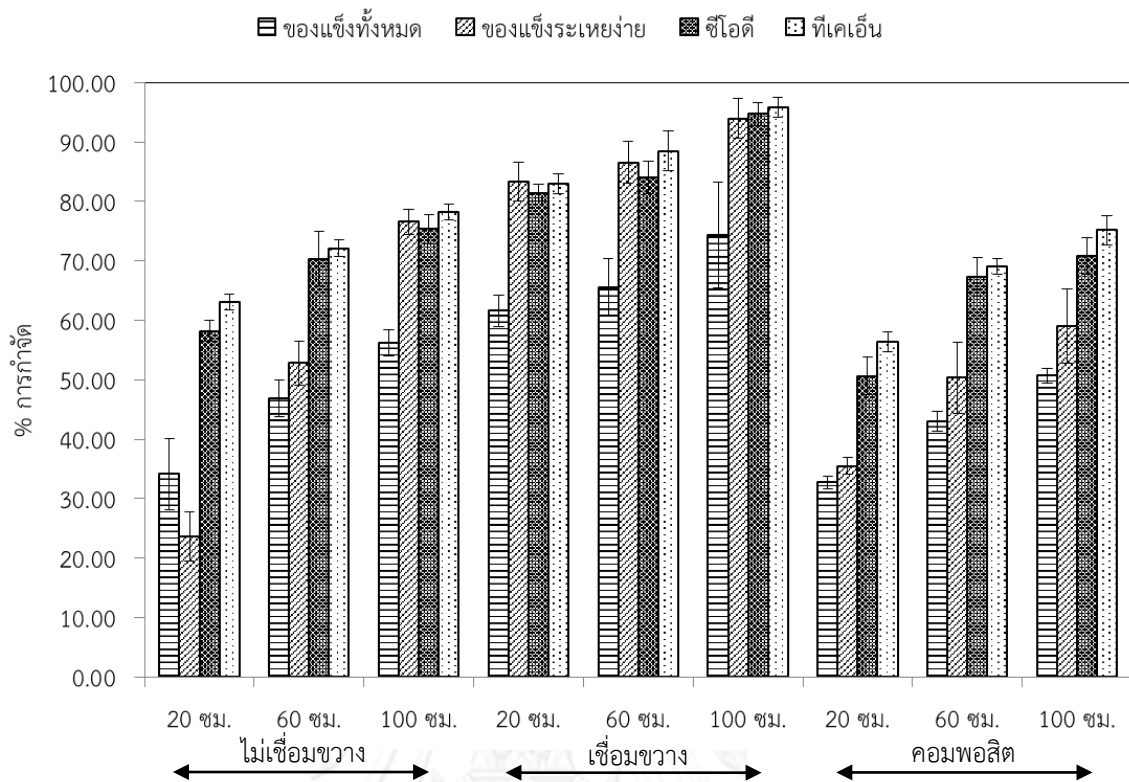
ดังตารางที่ 8 พบว่า ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวลดลงเมื่อความยาวของเมมเบรนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 และ 100 ซม. ตามลำดับ และที่ความยาวของเมมเบรนเดียวกัน ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ของมอดูลจากเมมเบรนแบบคอมพอสิต > จากเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง > จากเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ซีไอดี และทีเคเอ็น ดังรูปที่ 13 แสดงในทางกลับกัน คือ ของมอดูลจากเมมเบรนแบบคอมพอสิต < จากเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง < จากเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง ตามลำดับ ที่ทุกความยาวของเมมเบรนเดียวกัน แต่เมื่อความยาวของเมมเบรนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นตามลำดับ ค่าพีเอชของน้ำเพอร์มิเอตผ่านมอดูลไม่แตกต่างจากน้ำเสียดิบ แสดงว่าเมมเบรนไม่มีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำเปลี่ยนแปลง

ผลการศึกษาในส่วนนี้แสดงว่ามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนแบบคอมพอสิต ไม่น่าสนใจในการศึกษาผลการใช้ Spacer เพราะให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำมาก ถึงแม้จะให้ค่าฟลักซ์น้ำสูง แต่ข้อเสียในการให้ค่าฟลักซ์น้ำต่ำของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนทั้งแบบเชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวางอาจแก้ไขได้โดยการใช้ Spacer จึงจะใช้มอดูลจากเมมเบรน 2 ชนิดนี้ในการศึกษาผลการใช้ Spacer ในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 8 ค่าฟลักซ์และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบหมุนเป็นเกลียว

ชนิด เมมเบรน	ความยาว (ซม.)	ฟลักซ์ (ลบ.ชม.ต่อชั่วโมง ต่อตารางเมตร)	คุณภาพน้ำหลังการบำบัด				
			ของแข็ง ทั้งหมด (ก./ล.)	ของแข็ง ระเหยง่าย (ก./ล.)	ซีโอดี (ก./ล.)	ทีเคเอ็น (ก./ล.)	พีเอช
ไม่เชื่อมขวาง	20	30.1±0.9	3.3±0.2	2.8±0.2	1.7±0.1	0.7±0.0	7.8±0.0
	60	4.6±0.1	2.7±0.1	1.7±0.2	1.2±0.2	0.5±0.0	7.7±0.0
	100	1.4±0.1	2.2±0.1	0.9±0.1	1.0±0.1	0.4±0.0	7.5±0.0
เชื่อมขวาง	20	28.3±0.8	1.9±0.1	0.6±0.1	0.8±0.1	0.3±0.0	7.3±0.0
	60	3.9±0.1	1.7±0.2	0.5±0.1	0.6±0.1	0.2±0.0	7.2±0.0
	100	1.3±0.0	1.3±0.4	0.2±0.1	0.2±0.1	0.1±0.0	7.2±0.0
ดอมพอลิเมอร์	20	12,228.3±458.0	3.4±0.1	2.4±0.1	2.0±0.1	0.8±0.0	7.7±0.0
	60	1,023.0±10.8	2.9±0.2	1.8±0.2	1.3±0.1	0.6±0.0	7.6±0.0
	100	470.0±5.1	2.5±0.1	1.5±0.2	1.2±0.1	0.5±0.1	7.6±0.0

หมายเหตุ : ใช้แรงขับเคลื่อน (Driving force) = 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวจากเมมเบรนชนิดต่าง ๆ และที่ความยาวต่าง ๆ กัน

4.4 ผลการศึกษามอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี Spacer

เนื่องจากมีสมมติฐานว่า Spacer ช่วยให้เมมเบรนที่ม้วนทับกันรอบแกนกลางในแต่ละชั้นอยู่ห่างกัน ทำให้เกิดช่องว่างให้เพอร์มิเอตในมอดูลไหลไปยังรูรวมเพอร์มิเอตที่แกนกลางสะดวกขึ้น ทำให้ได้ฟลักซ์สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษา Spacer 2 ชนิด คือ ผ้าสปันปอนด์ กับตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก เนื่องจากผ้าสปันปอนด์มีการนำไปใช้งานเป็นผ้าอ้อม หรือผ้าอนามัย ซึ่งให้ของเหลวซึมผ่านได้อย่างรวดเร็ว แล้วยังนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุชั้นรองรับ (Support layer) ของเมมเบรนแบบคอมพอสิต แต่ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกมีช่องห่างชัดเจนและทำให้เกิดระยะห่างของเมมเบรน ที่ม้วนทับกันชัดเจนเท่ากับความหนาของตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก โดยในขั้นแรกกำหนดความยาวของ Spacer คงที่เท่ากับ 20 ซม. วางไว้บริเวณกลางแผ่นเมมเบรนไคโตซาน 2 แบบ คือแบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 100, 60 และ 20 ซม. แล้วม้วนรอบแกนกลางเจาะรูไปพร้อมกัน จากนั้นจึงจะเลือกประเภทมอดูลที่เหมาะสมนำไปศึกษาผลของความยาว Spacer ดังนี้

4.4.1 ผลของการใช้ Spacer ยาว 20 ซม.

ตารางที่ 9 แสดงผลของการใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ต่อค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล พบว่าการใช้ Spacer ทำให้ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลสูงขึ้นตามความคาดหมาย เมื่อใช้ Spacer ยาวเท่ากับเมมเบรน การใช้ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกให้ผลดีกว่าการใช้ผ้าสปันปอนด์อย่างชัดเจน เนื่องจากตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกทำให้เกิดระยะห่างของเมมเบรนในแต่ละชั้นที่มีวนทับกันเท่า ๆ กัน ตลอดความยาวของเมมเบรน แต่ถ้าความยาว Spacer น้อยกว่าเมมเบรนที่ใช้ในการม้วนมอดูล ความแตกต่างในค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลเมื่อใช้ Spacer เป็นผ้าสปันปอนด์กับตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกจะแตกต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตามค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลเมื่อใช้ Spacer ก็ยังสูงกว่าเมื่อไม่ใช้ Spacer มาก ในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าทั้งวัสดุและความยาวของ Spacer มีผลต่อความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว นอกจากนี้เป็นข้อสังเกตว่าการใช้ผ้าสปันปอนด์เป็น Spacer เพียง 20 ซม. สามารถปรับสมบัติความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางให้สูงขึ้น เป็น 192.5, 16.5 และ 1.4 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ เทียบเท่ากับการใช้เมมเบรนแบบคอมพอสิตโดยไม่มี Spacer ที่ทุกระดับความยาว (207.7, 12.4 และ 6.6 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ)

ตารางที่ 9 ผลของการใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ต่อค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูล

ความยาวของ เมมเบรน (ซม.)	ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว)					
	ไม่เชื่อมขวาง			เชื่อมขวาง		
	ไม่ใช้ Spacer	ผ้า สปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวด พลาสติก	ไม่ใช้ Spacer	ผ้า สปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวด พลาสติก
20	4.4	192.5	269	2.2	51.7	86.9
60	1.3	16.5	18.9	0.4	9.5	10.8
100	0.4	1.4	5	0.1	1.2	1.6

หมายเหตุ : ใช้ความดันด้านสารป้อนเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสียของมอดูลข้างต้นในตารางที่ 10 แสดงว่าการมี Spacer ทำให้ได้ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์สูงขึ้นมาก โดยการใช้ Spacer ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติกให้ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์สูงกว่าการใช้ Spacer ผ้าสปันปอนด์ ไม่ว่าจะใช้กับเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางหรือแบบเชื่อมขวางที่ทุกระดับความยาว แต่ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลงเมื่อความยาวของเมมเบรนมากขึ้น และค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากมอดูลของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางสูงกว่าจากมอดูลของเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถได้ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากมอดูลของ

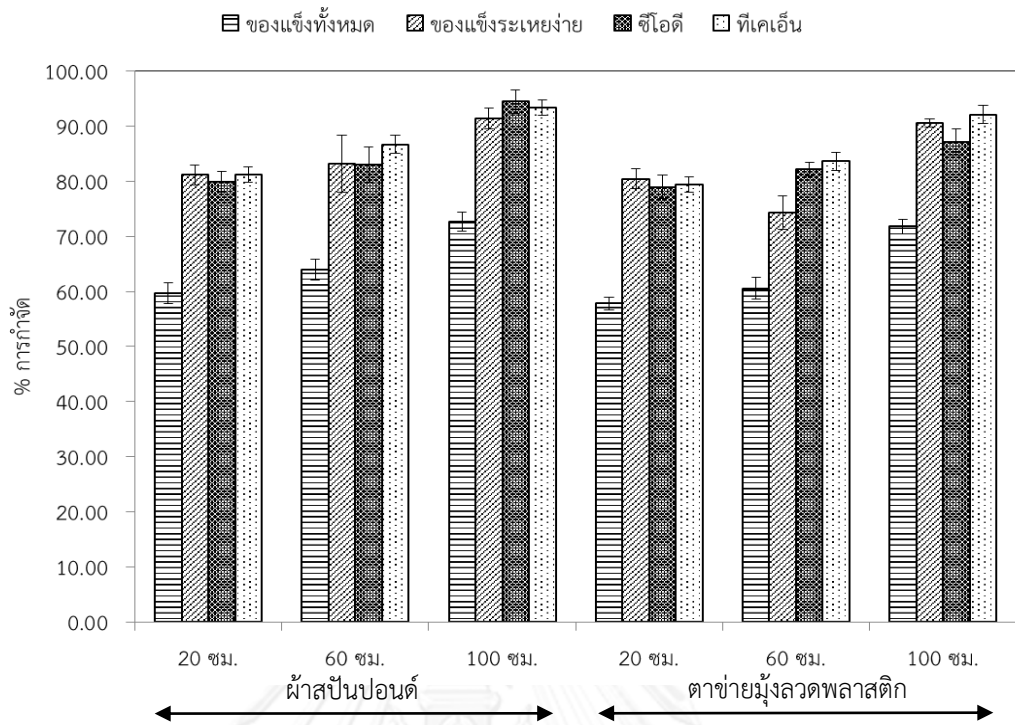
เมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางที่ใช้ Spacer ทั้งผ้าสปันปอนด์หรือตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก สูงเท่ากับมอดูลของเมมเบรนแบบคอมพอลิตที่ทุกระดับความยาวของเมมเบรน

ตารางที่ 10 ค่าฟลักซ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวที่ใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ในการบำบัดน้ำเสีย

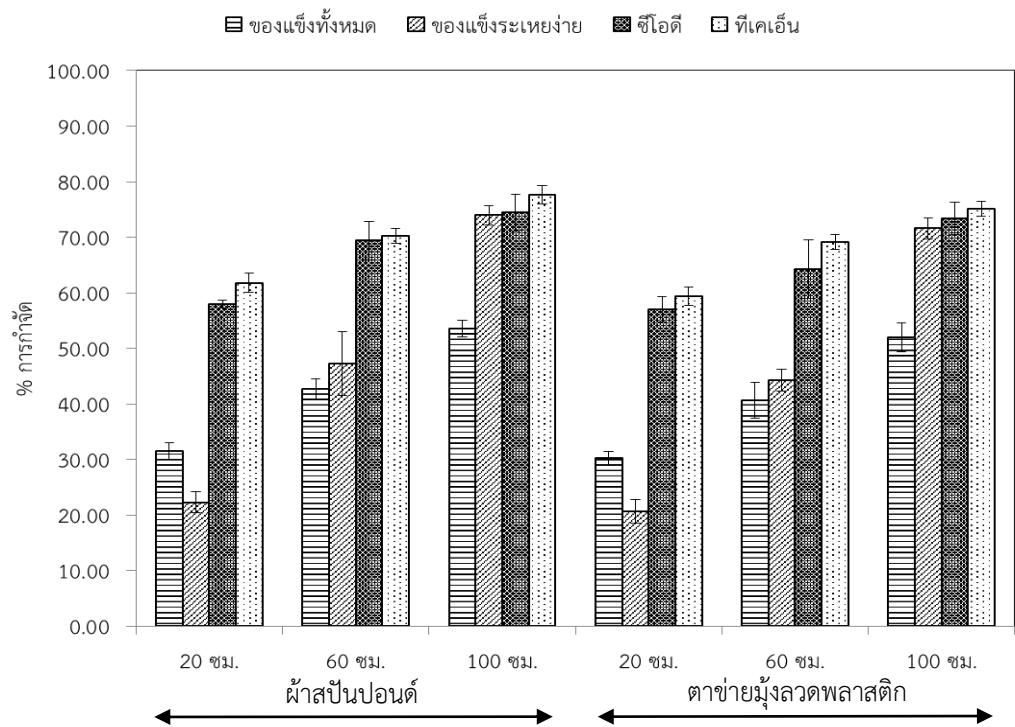
ความยาวของเมมเบรน (ซม.)	ค่าฟลักซ์จากการใช้มอดูลบำบัดน้ำเสีย (ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร)					
	ไม่เชื่อมขวาง			เชื่อมขวาง		
	ไม่ใช้ Spacer	ผ้าสปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก	ไม่ใช้ Spacer	ผ้าสปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก
20	30.1±0.9	2,436.2±59.7	5,280.7±215.2	28.3±0.8	172.6±0.7	389.8±5.7
60	4.6±0.1	197.7±1.3	290.5±1.9	3.9±0.1	53.7±0.6	106.2±1.6
100	1.4±0.1	53.5±0.4	109.5±2.9	1.3±0.0	37.1±0.6	49.6±0.8

หมายเหตุ : ใช้ความดันด้านสารป้อนเท่ากับ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเมื่อใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนโคโตะซานแบบไม่เชื่อมขวางและแบบเชื่อมขวาง แสดงดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ จะเห็นว่ามอดูลของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางให้ผลการบำบัดน้ำเสียทุก ๆ พารามิเตอร์ได้ดีกว่ามอดูลของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางที่ทุกระดับความยาว และการใช้ Spacer ที่เป็นผ้าสปันปอนด์ ให้ผลการบำบัดน้ำเสียดีกว่าการใช้ Spacer ที่เป็นตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก โดยคุณภาพน้ำที่ได้จากมอดูลของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. ใช้ Spacer ผ้าสปันปอนด์ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งทุกพารามิเตอร์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ซีโอดี และทีเคเอ็น สูงสุดเท่ากับร้อยละ 72.7±1.7, 91.4±1.8, 94.5±2.2, และ 93.3±1.4 ตามลำดับ น้ำเพอร์มิเอตมีค่าของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ซีโอดี และทีเคเอ็น เท่ากับ 1.4±0.1, 0.3±0.1, 0.2±0.1 และ 0.3±0.0 ก./ล. ตามลำดับ ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ที่ต่ำของมอดูลประเภทนี้อาจแก้ไขโดยเพิ่มความยาวของผ้าสปันปอนด์ที่ใช้เป็น Spacer ซึ่งจะได้เสนอผลการศึกษาในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเมื่อใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง



รูปที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวเมื่อใช้ Spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง

4.4.2 ผลของความยาวของ Spacer

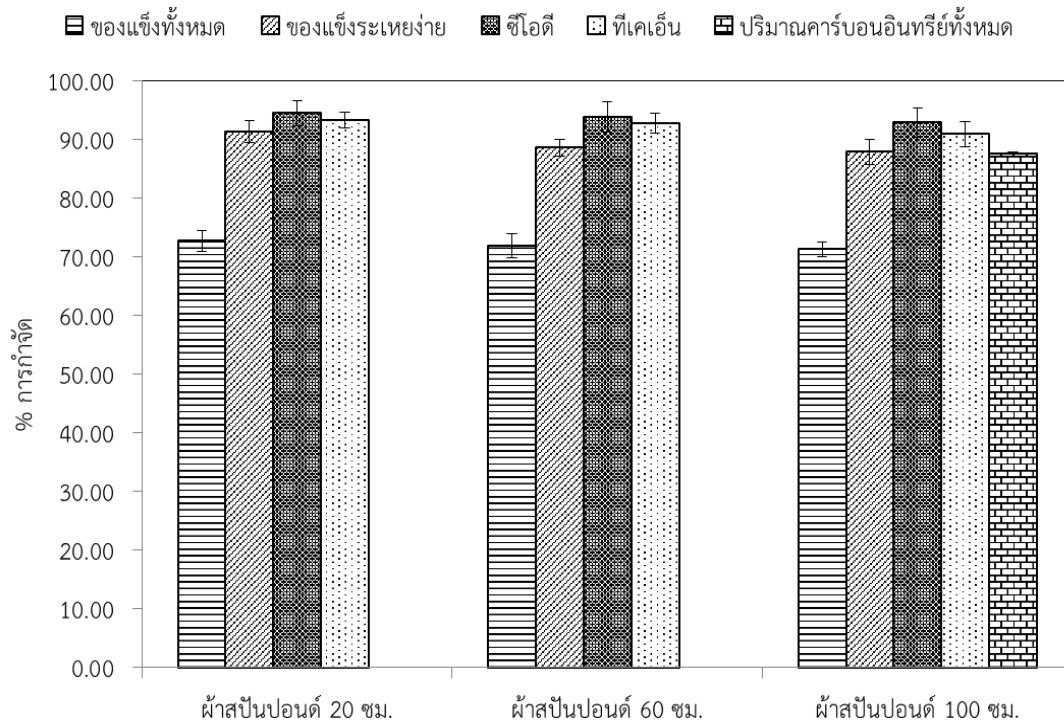
ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. โดยมี Spacer เป็นผ้าสปันปอนด์ที่ความยาว 20, 60 และ 100 ซม. มีค่าเท่ากับ 1.2, 11.6 และ 62 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อใช้ความยาวของ Spacer เท่ากับความยาวของเมมเบรน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของเมมเบรนตลอดความยาว ทำให้ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำเพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลนี้ ที่ความดัน 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงดังตารางที่ 11 พบว่าได้ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์เพิ่มขึ้น จาก 37.1 ± 0.6 เป็น 409.7 ± 8.9 และ 1398.1 ± 30.7 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร เมื่อความยาวของ Spacer ผ้าสปันปอนด์เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 และ 100 ซม. ตามลำดับ โดยมีคุณภาพน้ำออกจากมอดูลใกล้เคียงกันทุกระดับความยาวของ Spacer ผ้าสปันปอนด์ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด ดังแสดงในรูปที่ 16

สรุปได้ว่า รูปแบบการม้วนเมมเบรนที่เหมาะสมเพื่อทำเป็นมอดูลเมมเบรนแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound membrane module) ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นหลังสำหรับบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพ คือใช้เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. ม้วนเข้ากับ Spacer ผ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. มีสมบัติความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์เท่ากับ 62 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อใช้บำบัดน้ำเสียให้ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์เท่ากับ 1398.1 ± 30.7 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร มีคุณภาพน้ำในเทอมของของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่าย ซีไอดี ทีเคเอ็น และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด เท่ากับ 1.4 ± 0.0 , 0.4 ± 0.1 , 0.3 ± 0.1 , 0.2 ± 0.0 และ 11.7 ± 0.4 ก./ล.ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 71.3 ± 1.2 , 87.9 ± 2.1 , 92.9 ± 2.5 , 90.9 ± 2.1 และ 87.5 ± 0.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ผลของความยาว Spacer ต่อคุณภาพน้ำจากมอดูลของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม.

พารามิเตอร์น้ำทิ้ง	น้ำเสียดิบ	ความยาว Spacer ผ้าสปันปอนด์ (ซม.)		
		20	60	100
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	5.0 ± 0.2	1.4 ± 0.1	1.4 ± 0.1	1.4 ± 0.0
ของแข็งระเหยง่าย (ก./ล.)	3.6 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1
ซีไอดี (ก./ล.)	4.0 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1
ทีเคเอ็น (ก./ล.)	1.8 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (ก./ล.)	94.1 ± 0.8	N/A	N/A	11.7 ± 0.4
พีเอช	7.9 ± 0.0	7.2 ± 0.0	7.4 ± 0.0	7.5 ± 0.0

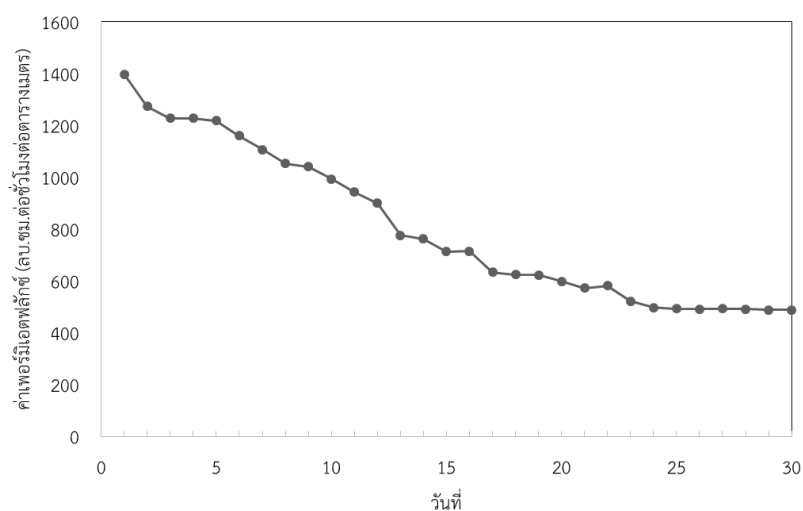
หมายเหตุ : ใช้ความดันด้านสารป้อนเท่ากับ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



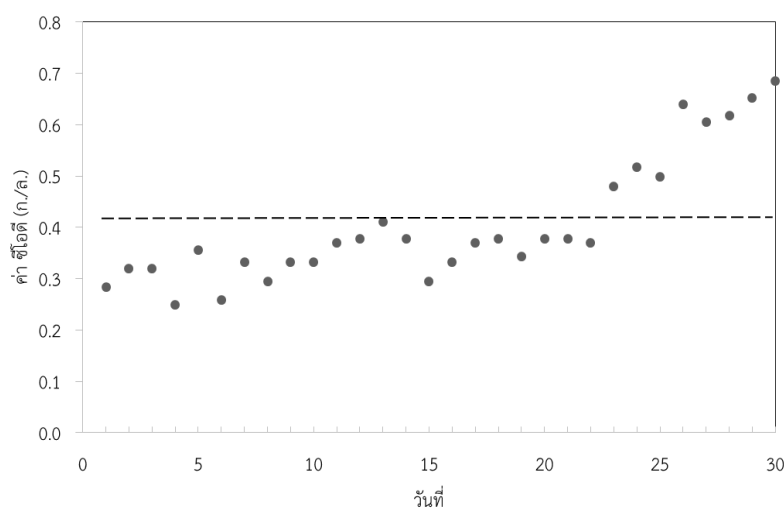
รูปที่ 16 ผลของความยาว Spacer ผ้าสปันบอนด์ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ด้วยมอดูลเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม.

4.5 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของมอดูลในการบำบัดน้ำทิ้งบ่อหมักแก๊สชีวภาพ

ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาอายุการใช้งานของมอดูลเมมเบรนเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. ที่มี Spacer ฝ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. พบว่า เมื่อใช้บำบัดน้ำเสีย ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ลดลงตามเวลาจาก 1398.1 ± 30.7 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ในวันแรก เหลือเพียง 582.8 ± 5.2 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ในวันที่ 22 ดังรูปที่ 17 และมีคุณภาพน้ำในเทอมของค่าซีไอดี ดังรูปที่ 18 เท่ากับ 0.4 ± 0.1 ก./ล. ซึ่งเท่ากับค่าสูงสุดของมาตรฐานน้ำทิ้งแล้ว ดังนั้น อายุการใช้งานของมอดูลนี้มีระยะเวลาประมาณ 22 วัน ซึ่งค่อนข้างสั้น อาจเนื่องมาจากความเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพของไคโตซานถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียในน้ำเสียไปด้วย



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากมอดูลเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. และมี Spacer ฝ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. เมื่อใช้บำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอดีในน้ำเพอร์มิเอตจากมอดูลเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. และมี Spacer ฝ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. เมื่อใช้บำบัดน้ำเสีย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. สมบัติของเมมเบรนไคโตซาน

1.1 สมบัติความชอบน้ำ

- ก) ลำดับความชอบน้ำเรียงจากมากไปน้อย คือ แบบคอมพอสิต > แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง > แบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง
- ข) ค่ามุมสัมผัสของแบบคอมพอสิต, แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง เท่ากับ 65.8 ± 2.7 , 78.3 ± 1.3 และ 95.1 ± 1.4 ตามลำดับ
- ค) ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์ของแบบคอมพอสิต, แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง เท่ากับ ∞ , 7.3 และ 6.1 ลบ.ซม. ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ

1.2 ค่า MWCO ของเมมเบรนแบบคอมพอสิต, แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง เท่ากับ 5000, 1000 และ 500 ดอลตัน ตามลำดับ เทียบเท่ากับเมมเบรนประเภท Nanofiltration ถึง Ultrafiltration, Nanofiltration และ Nanofiltration ถึง Reverse osmosis ตามลำดับ

2. เมมเบรนมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว (Spiral wound module membrane) แบบไม่มี Spacer

เมมเบรนมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวได้จากการม้วนเมมเบรนไคโตซาน 3 แบบข้างต้น ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 20, 60 และ 100 ซม. (ทีละชนิดและทีละขนาด) รอบแกนกลางเจาะรู ได้ผลดังนี้

ชนิดของเมมเบรน		คอมพอสิต			ไม่เชื่อมขวาง			เชื่อมขวาง			
ความยาว (ซม.)		20	60	100	20	60	100	20	60	100	
ค่าความสามารถ แพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม./ซม.-ตร.ม.- ปอนด์ต่อตร.นิ้ว)		207.7	12.4	6.6	4.4	1.3	0.4	2.2	0.4	0.1	
คุณภาพน้ำหลังการบำบัด	ฟลักซ์ (ลบ.ซม./ซม.- ตร.ม.)	12,228.3 ±458.0	1,023.0 ±10.8	470.0 ±5.1	30.1 ±0.9	4.6 ±0.1	1.4 ±0.1	28.3 ±0.8	3.9 ±0.1	1.3 ±0.0	
	ของแข็งทั้งหมด	ก./ล.	3.4 ±0.1	2.9 ±0.2	2.5 ±0.1	3.3 ±0.2	2.7 ±0.1	2.2 ±0.1	1.9 ±0.1	1.7 ±0.2	1.3 ±0.4
		% การกำจัด	32.8 ±1.1	43.0 ±1.7	50.7 ±1.2	34.1 ±6.0	46.9 ±3.0	56.3 ±2.2	61.6 ±2.6	65.6 ±4.8	74.3 ±8.8
	ของแข็งระเหยง่าย	ก./ล.	2.4 ±0.1	1.8 ±0.2	1.5 ±0.2	2.8 ±0.2	1.7 ±0.2	0.9 ±0.1	0.6 ±0.1	0.5 ±0.1	0.2 ±0.1
		% การกำจัด	35.5 ±1.4	50.4 ±6.0	59.1 ±6.2	23.6 ±4.1	52.8 ±3.7	76.6 ±2.2	83.3 ±3.3	86.6 ±3.6	93.9 ±3.4
	ซีโอดี	ก./ล.	2.0 ±0.1	1.3 ±0.1	1.2 ±0.1	1.7 ±0.1	1.2 ±0.2	1.0 ±0.1	0.8 ±0.1	0.6 ±0.1	0.2 ±0.1
		% การกำจัด	50.6 ±3.2	67.3 ±3.3	70.9 ±3.1	58.2 ±1.7	70.4 ±4.5	75.3 ±2.4	81.4 ±1.4	84.1 ±2.7	94.7 ±2.0
	ทีเคเอ็น	ก./ล.	0.8 ±0.0	0.6 ±0.0	0.5 ±0.1	0.7 ±0.0	0.5 ±0.0	0.4 ±0.0	0.3 ±0.0	0.2 ±0.0	0.1 ±0.0
		% การกำจัด	56.4 ±1.7	69.1 ±1.4	75.2 ±2.5	63.0 ±1.4	72.1 ±1.4	78.2 ±1.4	83.0 ±1.7	88.5 ±3.3	95.8 ±1.7

3. เมมเบรนมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี Spacer ยาว 20 ซม.

ใช้ Spacer 2 ชนิด คือ ผ้าสปันปอนด์ กับตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก วางไว้บริเวณกลางแผ่นเมมเบรนไคโตซาน 2 แบบ คือ แบบเนื้อแน่นไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบเนื้อแน่นมีการเชื่อมขวาง ที่ความยาว 3 ขนาด คือ 20, 60 และ 100 ซม. แล้วม้วนรอบแกนกลางเจาะรูไปพร้อมกัน ได้ผลดังนี้

ชนิดของเมมเบรน		ไม่เชื่อมขวาง						เชื่อมขวาง						
ชนิดของ Spacer		ผ้าสปันปอนด์			ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก			ผ้าสปันปอนด์			ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก			
ความยาวของเมมเบรน (ซม.)		20	60	100	20	60	100	20	60	100	20	60	100	
ค่าความสามารถแพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม./ซม.-ตร.ม.-ปอนด์ต่อตร.นิ้ว)		192.5	16.5	1.4	269	18.9	5	51.7	9.5	1.2	86.9	10.8	1.6	
คุณภาพน้ำหลังการบำบัด	ฟลักซ์ (ลบ.ซม./ซม.-ตร.ม.)	2,436.2 ±59.7	197.7 ±1.3	53.5 ±0.4	5,280.7 ±215.2	290.5 ±1.9	109.5 ±2.9	172.6 ±0.7	53.7 ±0.6	37.1 ±0.6	389.8 ±5.7	106.2 ±1.6	49.6 ±0.8	
	ของแข็งทั้งหมด	ก./ล.	3.4 ±0.2	2.9 ±0.2	2.3 ±0.1	3.5 ±0.2	3.0 ±0.1	2.4 ±0.2	2.0 ±0.1	1.8 ±0.1	1.4 ±0.1	2.1 ±0.0	2.0 ±0.1	1.4 ±0.1
		% การกำจัด	31.5 ±1.5	42.7 ±1.8	53.5 ±1.5	30.3 ±1.2	40.6 ±3.3	51.9 ±2.6	59.6 ±1.9	63.9 ±1.9	72.7 ±1.7	57.8 ±1.2	60.6 ±2.0	71.8 ±1.3
	ของแข็งระเหยง่าย	ก./ล.	2.8 ±0.1	1.9 ±0.1	1.0 ±0.1	2.9 ±0.2	2.0 ±0.1	1.0 ±0.1	0.7 ±0.1	0.6 ±0.2	0.3 ±0.1	0.7 ±0.1	0.9 ±0.1	0.3 ±0.0
		% การกำจัด	22.3 ±1.9	47.2 ±5.8	74.0 ±1.7	20.7 ±2.2	44.3 ±1.9	71.6 ±1.9	81.1 ±1.8	83.2 ±5.2	91.4 ±1.8	80.4 ±1.8	74.3 ±3.1	90.5 ±0.8
	ซีโอดี	ก./ล.	1.7 ±0.1	1.2 ±0.1	1.0 ±0.2	1.7 ±0.1	1.4 ±0.2	1.1 ±0.1	0.8 ±0.1	0.7 ±0.1	0.2 ±0.1	0.9 ±0.1	0.7 ±0.1	0.5 ±0.1
		% การกำจัด	57.9 ±0.7	69.4 ±3.4	74.5 ±3.3	57.0 ±2.3	64.3 ±5.2	73.4 ±2.9	79.9 ±1.9	83.0 ±3.2	94.5 ±2.2	79.0 ±2.2	82.2 ±1.2	87.1 ±2.4
	ทีเคเอ็น	ก./ล.	0.7 ±0.0	0.6 ±0.0	0.4 ±0.0	0.8 ±0.0	0.6 ±0.0	0.5 ±0.0	0.4 ±0.0	0.3 ±0.0	0.1 ±0.0	0.4 ±0.0	0.3 ±0.0	0.2 ±0.0
		% การกำจัด	61.8 ±1.7	70.3 ±1.4	77.6 ±1.7	59.4 ±1.7	69.1 ±1.4	75.2 ±1.4	81.2 ±1.4	86.7 ±1.7	93.3 ±1.4	79.4 ±1.4	83.6 ±1.7	92.1 ±1.7

4. ผลของความยาวของ Spacer

ใช้ Spacer ฝ้าสปันปอนด์ความยาว 20, 60 และ 100 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. เตรียมเป็นมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว ได้ผลดังนี้

ความยาวของ Spacer (ซม.)		20	60	100	
ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำ (ลบ.ซม./ซม.-ตร.ม.-ปอนด์ต่อตร.นิ้ว)		1.2	11.6	62	
คุณภาพน้ำหลังการบำบัด	ฟลักซ์ (ลบ.ซม./ซม.-ตร.ม.)	37.1±0.6	409.7±8.9	1398.1±30.7	
	ของแข็งทั้งหมด	ก./ล.	1.4±0.1	1.4±0.1	1.4±0.0
		% การกำจัด	72.7±1.7	71.9±2.1	71.3±1.2
	ของแข็งระเหยง่าย	ก./ล.	0.3±0.1	0.4±0.1	0.4±0.1
		% การกำจัด	91.4±1.8	88.6±1.4	87.9±2.1
	ซีไอดี	ก./ล.	0.2±0.1	0.3±0.1	0.3±0.1
		% การกำจัด	94.5±2.2	93.8±2.6	92.9±2.5
	ทีเคเอ็น	ก./ล.	0.1±0.0	0.1±0.0	0.2±0.0
		% การกำจัด	93.3±1.4	92.7±1.7	90.9±2.1

5. รูปแบบการม้วนเมมเบรนที่เหมาะสม คือใช้เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. ม้วนเข้ากับ Spacer ฝ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม.
6. อายุการใช้งานของมอดูลเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวางยาว 100 ซม. ม้วนเข้ากับ Spacer ฝ้าสปันปอนด์ยาว 100 ซม. มีระยะเวลาประมาณ 22 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาสมรรถนะของมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวของเมมเบรนไคโตซานกับน้ำเสียประเภทอื่นที่ไม่มีจุลินทรีย์เพื่อยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนไคโตซาน และบำบัดได้ยากด้วยเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบทั่วไป เช่น น้ำเสียสีย้อม เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] พลังงาน, กระทรวง. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. พลังงานกู้โลกร้อนเชื้อเพลิงทางเลือกทางรอดประเทศไทย
- [2] ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์, 2552.
- [3] วิทยาศาสตร์, กระทรวง. เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม
- [4] Lee, Y.M., Nam, S.Y. and Woo, D.J. Pervaporation of ionically surface crosslinked chitosan composite membranes for water-alcohol mixtures. Journal of Membrane Science 133 (1997): 103-110.
- [5] ชันทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] กระทรวงพลังงาน. พลังงานทดแทน. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/พลังงานทดแทน> [17 พฤศจิกายน 2556]
- [7] พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แก๊สชีวภาพ. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th> [17 พฤศจิกายน 2556]
- [8] วิทยาศาสตร์, กระทรวง. สถาบันวิจัยและพัฒนาการพลังงานนครพิงค์ (สวพ.). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. คุณภาพน้ำที่ปล่อยออกจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ
- [9] Lim, J.W., Chen, C.-L., Ho, L.J.R. and Wang, J.-Y. Study of microbial community and biodegradation efficiency for single and two-phase anaerobic co-digestion of brown water and food waste. Bioresource Technology 147 (2013): 193–201.
- [10] Gonzalez, A.G., Cuadros, F., Celma, A.R. and Rodriguez, F.L. Potential application anaerobic digestion to tobacco plant. Fuel 113 (2013): 415–419.
- [11] Elizabeth, Caught in the crossflow. Journal of Nature [Online]. 2001. Available from: http://www.nature.com/nature/journal/v412/n6845/fig_tab/412387a0_F2.html [2013,Nov. 17]

- [12] Lenntech, Reverse osmosis desalination process. [Online]. 1998. Available from: <http://www.lenntech.com/processes/desalination/reverse-osmosis/general/reverse-osmosis-desalination-process.htm> [2013,Nov. 17]
- [13] Zhu, Y., Xia, S., Liu, G. and Jin, W. Preparation of ceramic-supported poly (vinyl alcohol)-chitosan composite membranes and their applications in pervaporationn dehydration of organic/water mixtures. Journal of Membrane Science 349 (2010): 341–348.
- [14] Sairam, M., Loh, X.X., Bhole, Y., Sereewatthanawut, I., Li, K., Bismarck, A., Steinke, J.H.G. and Livingston, A.G. Spiral-wound polyaniline membrane modules for organic solvent nanofiltration (OSN). Journal of Membrane Science 349 (2010): 123–129.
- [15] Belkhouche, N.-E., Didi, M.A., Taha, S. and Fares, N.B. Zinc rejection from leachate solutions of industrial solid waste - effects of pressure and concentration on nanofiltration membrane performance. Desalination 239 (2009): 58–65.
- [16] Qiu, Y.-R., Zhong, H. and Zhang, Q.-X. Treatment of stable oil/water emulsion by novel felt-metal supported PVA composite hydrophilic membrane using cross flow ultrafiltration. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 19 (2009): 773-777.
- [17] Mierzwa, J.C., Hespanhol, I., da Silva, M.C.C., Rodrigues, L.D.B. and Giorgi, C.F. Direct drinking water treatment by spiral-wound ultrafiltration membranes. Desalination 230 (2008): 41–50.
- [18] Reimann, W. and Yeo, I. Ultrafiltration of agricultural waste waters with organic and inorganic membranes. Desalination 109 (1997): 263-267.
- [19] อัญชลี แทนนิล, การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกรไบโपाल์มและขยะของแข็งชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [20] APHA American Public Health Association. New York: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 1999

- [21] Matweb, PolyMirae Moplen HP562S Fiber (Spunbond). [Online]. 1996. Available from: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=07468e0c906f4d2fafbe9577cc9c09af> [2014,Mar. 4]
- [22] Matweb, PolyMirae Moplen HP562T Fiber (Spunbond). [Online]. 1996. Available from: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=a91b4c3e5a4a45dc83b24e506a796cca> [2014,Mar. 4]





ภาคผนวก

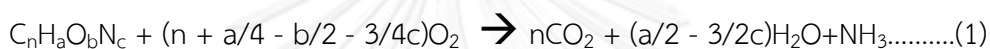
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

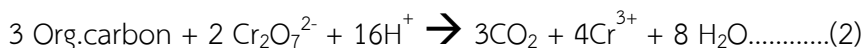
1. Chemical oxygen demand (COD) แบบ Closed reflux, Titrimetric method

ค่า COD หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100 %) จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการที่ 1



จะเห็นว่าสมการการเกิดปฏิกิริยาของ COD คือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ส่วน COD ใช้ตัวเติมออกซิเจน (oxidizer) กรณีที่น้ำเสียมีสารอินทรีย์บางพวกเช่น straight-chain aliphatic compound, aromatic hydrocarbon, pyridine และ betaine ปะปน อยู่ซึ่งสารเหล่านี้จะไม่ถูก oxidize ทางเคมี การหาค่า COD จะรู้ผลในเวลาไม่เกิน 3 ชม. ดังนั้นจึงเหมาะในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียเพราะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องได้ทันทีที่ใช้ในการประเมินค่า BOD อย่างคร่าว ๆ

Strong oxidizing agent ที่ใช้ในการหาค่า COD มีด้วยกันหลายตัวคือ potassium permanganate, ferric sulfate, potassium iodate และ potassium dichromate การหาค่า COD โดยใช้โปแตสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอนหลักการของวิธีนี้คือ สารคาร์บอนอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์โดยโปแตสเซียมไดโครเมตในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การรีฟลักซ์ เพื่อป้องกันการระเหยสูญหายของสารเคมี จากนั้นจึงไทเทรตหาปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วย ferrous ammonium sulfate โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



มีการเติม AgSO_4 เป็นตัว catalyst เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ของพวกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ (straight chain aliphatic) นอกจากนี้ AgSO_4 ที่ใส่ไปจะไปทำปฏิกิริยากับ Cl^- , Br^- หรือ I^- ได้ แต่ AgSO_4 เป็น catalyst ที่ไม่ได้ผลในการออกซิไดซ์สารประกอบพวก aromatic และ pyridine สารรบกวนที่สำคัญคือ Cl^- จึงต้องใส่ HgSO_4 ลงไปก่อนเพื่อไปจับกับ Cl^- ให้อยู่ในรูปของ mercuric chloride complex โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่า COD ตั้งแต่ 50 มก./ล ขึ้นไปได้ และแน่นอน การรีฟลักซ์ มี 2 วิธี คือ แบบเปิด (Open Reflux) และแบบปิด (Closed Reflux)

ทั้งสองวิธีการมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแบบปิด สารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่าระบบเปิด เพราะมีเวลาในการสัมผัสกับสารออกซิไดซ์ได้นานกว่า

การวิเคราะห์หาค่า COD โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) มีหลักการเช่นเดียวกับวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux) สารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่าในระบบเปิดเพราะมีเวลาสัมผัสกับสารออกซิไดซ์ได้นานกว่า ก่อนทำการทดลองทุกครั้งควรตรวจดูฝาปิดหลอดแก้วว่ามีรอยแตกหรือไม่ ฝาจุกของหลอดทดลองที่อาจเกิดชำรุดในขณะที่ทำการย่อยสลายในตู้อบจะทำให้เกิดการปนเปื้อน และทำให้มีการสูญหายของสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงควรที่จะต้องระมัดระวังสำหรับการย่อยสลายในตู้อบจะใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การเลือกขนาดของหลอดที่ใช้ขึ้นอยู่กับความไว (sensitivity) ที่ต้องการ

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.0167 M ละลาย $K_2Cr_2O_7$ 4.913 กรัม ที่อบแห้งในตู้อบอุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (dessicator) ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติม $HgSO_4$ 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ ละลาย Ag_2SO_4 22 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.0 กิโลกรัม (ต้องใช้เวลาในการละลาย 1-2 วัน)

3. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ ละลาย $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.695 กรัม และ 1,10 phenanthroline monohydrate 1.485 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 M ละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot H_2O$ 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทั้งไว้ให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่ามาใช้ เติมสารเคมีตามตารางภาคผนวกที่ ก-1 ในภาชนะย่อยสลาย แต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด ทำประมาณ 1-2 หลอด ไทเทรทจนถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

$$\text{Molarity ของ } Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 = \frac{\text{มิลลิลิตร } K_2Cr_2O_7 \times 0.1}{\text{มิลลิลิตร } Fe(NH_4)_2(SO_4)_2}$$

ตารางที่ ก-1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่าง ๆ ของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย

ขนาดของภาชนะ	ตัวอย่างน้ำ (ml)	K ₂ Cr ₂ O ₇ (ml)	กรดซัลฟิวริก (ml)	ปริมาตรทั้งหมด (ml)
16 X 100 mm.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 X 150 mm.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 X 150 mm.	10.0	6.0	14.0	30.0
แอมพูมาตรฐาน 10 ml	2.5	1.5	3.5	7.5

วิธีการวิเคราะห์

- ล้างหลอดย่อยสลายและฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก 20 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำไปใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
- เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตารางที่ ก-1
- นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลายหรือแอมพูล เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลาย ซึ่งได้แก่สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต
- ค่อย ๆ เทกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นตัวอย่างน้ำและสารละลายในการย่อยสลาย
- ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นหรือถ้าใช้แอมพูลก็ให้เชื่อมต่อให้สนิท แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลาย ๆ ครั้งเพื่อผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
- นำหลอดทดลองนี้ไปใส่เครื่องย่อยสลาย (block digester) หรือตู้อบ ซึ่งได้ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสก่อน ใช้เวลารีฟลักซ์ 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง โดยนำหลอดทดลองมาวางในที่วางหลอดทดลอง
- เปิดฝาจุกแล้วจึงใส่แท่งแม่เหล็กที่หุ้มด้วยทีเอฟอี (TFE covered magnetic bar) ถ้าใช้แอมพูล ให้เทของผสมลงไปในภาชนะที่ใหญ่กว่า เพื่อนำไปไตเตรท เติมนิวโรอินอินดิเคเตอร์ประมาณ 1-2 หยด คนโดยใช้เครื่องกวนชนิดใช้แม่เหล็ก (magnetic stirrer) อย่างรวดเร็วในขณะที่ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 M จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง ถึงแม้บางครั้งสีฟ้าอมเขียวอาจจะกลับมาปรากฏอีกในหลายนาทีถัดมา และในลักษณะเดียวกันให้ทำรีฟลักซ์ และไตเตรทแบบลงค้ที่มีรีเอเจนต์กับน้ำกลั่นในปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำด้วย

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร COD} = \frac{(A-B) \times M \times 8,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

A = มิลลิลิตร Fe(NH₄)₂(SO₄)₂ ที่ใช้ในการไตเตรทแบบลงค้

B = มิลลิลิตร Fe(NH₄)₂(SO₄)₂ ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ

M = Molarity ของ Fe(NH₄)₂(SO₄)₂

2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากสารตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (dessicator) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น จะได้ปริมาณของของแข็งทั้งหมด

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่จะใช้ต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน สมมติ = A มิลลิกรัม
2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสม
3. ค่อย ๆ รินตัวอย่างน้ำที่ต้องการหาของแข็งทั้งหมดใส่ในจานระเหย นำไประเหยน้ำออกให้หมดบน water bath หรือ hot plate นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติ = B มิลลิกรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็คือ น้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร total solids} = \frac{(A-B) \text{ มิลลิกรัม} \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

3. ของแข็งระเหยง่าย (Total volatiles solids, TVS)

ของแข็งระเหยง่าย หมายถึง ปริมาณของสารที่ระเหยไปได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไปเรียกว่าปริมาณของแข็งคงตัว (fix solids)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำจานระเหยที่ได้จากการหาปริมาณของแข็งทั้งหมดแล้ว นำไปเผาในเตาเผา (muffle furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
2. ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร fix solids} = \frac{\text{มิลลิกรัม fix solids} \times 1,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

ดังนั้น มิลลิกรัม/ลิตร total volatiles solids = มิลลิกรัม/ลิตร total solids – มิลลิกรัม/ลิตร fix solids

4. เจลดาห์ลไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หมายถึงผลบวกระหว่างออร์แกนิกไนโตรเจน (organic nitrogen) และแอมโมเนียไนโตรเจน (ammonia nitrogen) สำหรับการวิเคราะห์หาออร์แกนิกไนโตรเจนถ้าไม่ได้แยกแอมโมเนียไนโตรเจนออกเสียก่อน ผลที่ได้จะได้เป็นไนโตรเจนทั้งหมด โดยไนโตรเจนทั้งหมดที่จะกล่าวถึงนี้หาได้โดยวิธีเจลดาห์ล มีเมอร์คิวรี (II) ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งจะเปลี่ยนพวกออร์แกนิกไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต หลังจากการย่อยสลายละลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นตัวเพิ่มจุดเดือดให้สูงขึ้นถึง 344-371 องศาเซลเซียส หลังจากการย่อยสลายแล้วให้เจือจางส่วนที่เหลือภายในขวดเจลดาห์ลแล้วทำให้เป็นต่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น นำไปกลั่นโดยมีสารละลายกรดบอริกเป็นตัวดูดกลืนสารเคมี

1. สารละลายสำหรับการย่อยสลาย (digestion solution) ละลาย K_2SO_4 134 กรัม ในน้ำกลั่น 650 มิลลิลิตร ผสมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 200 มิลลิลิตร แล้วละลายเมอร์คิวรี (II) ออกไซด์แดง (red mercury (II) oxide) 2 กรัม ในกรดซัลฟูริก 3 N ค่อย ๆ เติมลงในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต แล้วเจือจางปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 14 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันการตกตะกอน

2. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์

3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium hydroxide-sodium thiosulphate reagent) ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัม และโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตาไฮเดรต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

4. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator) ละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (methyl red indicator) 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 เปอร์เซ็นต์ 100 มิลลิลิตร ละลายเมทิลีนบลู (methylene blue) 100 มิลลิกรัมในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ 50 มิลลิลิตร แล้วผสมสารละลายทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกัน สารละลายนี้ควรเตรียมทุก ๆ เดือน

5. สารละลายอินดิเคตติ้งบอริกแอซิด (indicating boric acid solution) ละลายกรดบอริก 20 กรัม ในน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย เติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

6. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.01 M

วิธีการวิเคราะห์

1. ตวงตัวอย่างน้ำโดยให้มีปริมาตรที่เหมาะสม ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ ก-2 ใส่ลงในขวดเจลดาห์ลและใส่ลูกแก้ว 3-4 ลูก

2. เติมสารละลายสำหรับการย่อยสลายออร์แกนิกไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร

3. ต้มเคี่ยวจนได้สารละลายใส เคี่ยวต่อไปอีก 20-30 นาที ปล่อยให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 300 มิลลิลิตร

4. ทำให้เป็นต่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไธโอซัลเฟต ประมาณ 50 มิลลิลิตร โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วนำไปกลั่นลงในสารละลาย

อินดิเคติงบอริกแอซิด 50 มิลลิลิตร จนได้ปริมาตรทั้งหมดเป็น 200 มิลลิลิตร

5. ทำส่วนที่กลั่นได้ให้เย็น นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.01 M โดยใช้อินดิเคเตอร์ผสม 2-3 หยด จดปริมาตรของกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้ไว้

วิธีการคำนวณ

$$\text{มิลลิกรัม/ลิตร total nitrogen} = \frac{(A-B) \times M \times 1,000 \times 28}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

A = มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้สำหรับตัวอย่างน้ำ

B = มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้สำหรับแบลงค์

M = Molarity ของสารละลายกรดซัลฟิวริกมาตรฐานที่ใช้

ตารางที่ ก-2 ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม

ออร์แกนิกไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำ (mg/l)	ปริมาณของตัวอย่างน้ำ (ml)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณการเตรียมสารละลายมูลสุกรที่มีของแข็งทั้งหมดประมาณ 5 กรัม/ลิตร

มูลสุกรมีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 25 กรัม/ลิตร ต้องการปริมาณของแข็ง 5 กรัม/ลิตร ปริมาณ 1 ลิตร

จากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

C_1 = ความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดของมูลสุกร (กรัม/ลิตร)

V_1 = ปริมาตรของมูลสุกร (ลิตร)

C_2 = ความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดของสารละลายมูลสุกร (กรัม/ลิตร)

V_2 = ปริมาตรของสารละลายมูลสุกร

$$(25 \times V_1) = (5 \times 1)$$

$$V_1 = (5 \times 1)/25 = 0.2 \text{ ลิตร}$$

ดังนั้น ปริมาตรของมูลสุกรที่นำมาใช้เท่ากับ 200 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร จึงได้สารละลายมูลสุกรที่มีของแข็งทั้งหมด 5 กรัม/ลิตร

2. การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด (% removal)

ประสิทธิภาพการกำจัดจากการม้วนเมมเบรนโคโตะซานเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง 20 ซม. ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด (\%)} = \frac{\text{สารอินทรีย์ที่เข้าระบบ} - \text{สารอินทรีย์ที่ออกจากระบบ}}{\text{สารอินทรีย์ที่เข้าระบบ}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ (%)

COD ที่เข้าระบบ = 4.04 กรัม/ลิตร

COD ที่ออกจากระบบ = 1.69 กรัม/ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD} &= \frac{(4.04 - 1.69) \times 100}{4.04} \\ &= 58.2 \% \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ (%)

TS ที่เข้าระบบ = 4.99 กรัม/ลิตร

TS ที่ออกจากระบบ = 3.28 กรัม/ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TS} &= \frac{(4.99 - 3.28) \times 100}{4.99} \\ &= 34.1 \% \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ประสิทธิภาพการกำจัด TVS ของระบบ (%)

TVS ที่เข้าระบบ = 3.64 กรัม/ลิตร

TVS ที่ออกจากระบบ = 2.78 กรัม/ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TVS} &= \frac{(3.64 - 2.78) \times 100}{3.64} \\ &= 23.6 \% \end{aligned}$$

ในกรณีค่าอื่น ๆ ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

3. ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

การคำนวณค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ เมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบมีการเชื่อมขวาง

ปริมาณเพอร์เมตที่ผ่านเมมเบรน (Q) = 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

พื้นที่ผิวของเมมเบรน (A) = 1.1341×10^{-3} ตารางเมตร

เวลาที่เก็บเพอร์เมต (Δt) = 2.33 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } J &= Q / A\Delta t \\ &= 5 / (1.1341 \times 10^{-3} \times 2.33) \\ &= 1,892.2 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

4. ค่าเพอร์เมตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสีย

การคำนวณค่าเพอร์เมตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสีย จากการม้วนเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบไม่เชื่อมขวาง 20 ซม. ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว ที่ความดัน 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ปริมาณเพอร์เมตที่ผ่านเมมเบรน (Q) = 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

พื้นที่ผิวของเมมเบรน (A) = 0.046 ตารางเมตร

เวลาที่เก็บเพอร์เมต (Δt) = 6.99 ชั่วโมง

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร} \quad J &= Q / A\Delta t \\
 &= 10 / (0.046 \times 6.99) \\
 &= 31.1 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

5. การเตรียมสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (พีพีเอ็ม)

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่น้ำหนักโมเลกุล 200 ให้มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

สารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่น้ำหนักโมเลกุล 200

ความหนาแน่น : 1.124 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

สถานะ : ของเหลวใส

พอลิเอทิลีนไกลคอล 1 กรัม ต้องใช้ปริมาตรที่คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร } D &= M/V \quad ; \quad D = \text{ความหนาแน่น}, M = \text{น้ำหนัก} \text{ และ } V = \text{ปริมาตร} \\
 V &= M/D = 1 / 1.124 = 0.890 \text{ มิลลิลิตร}
 \end{aligned}$$

การเตรียมสารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ให้มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ใช้น้ำหนักโมเลกุล 200 จะต้องใช้ปริมาตรเท่ากับ 0.890 มิลลิลิตร และเติมน้ำให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร

6. ค่าร้อยละการกักกัน

การคำนวณค่าร้อยละการกักกันสารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 1,000 ดอลตัน ของเมมเบรนไคโตซานเนื้อแน่นแบบเชื่อมขวาง

$$C_p = 12.85 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$C_f = 154.17 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\%R = ((154.17 - 12.85)/154.17) \times 100$$

ดังนั้น ได้ค่าร้อยละการกักกัน = 91.7 %

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

ตารางที่ ค-1 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรนไคซาน	ความดันที่เป็นแรงขับ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง)
แบบไม่เชื่อมขวาง	100	969.3±17.2
	200	1,742.7±19.5
	300	2,421.1±40.6
แบบเชื่อมขวาง	100	673.8±8.7
	200	1,395.1±21.8
	300	1,885.4±6.6

2. ค่า MWCO ของเมมเบรน

ตารางที่ ค-2 ค่าร้อยละการกักกันสารละลาย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 200, 550, 1000, 2500 และ 5000

ชนิดของเมมเบรน	ร้อยละการกักกัน				
	PEG 200	PEG 550	PEG 1000	PEG 2500	PEG 5000
แบบไม่เชื่อมขวาง	50.4±0.3	80.7±0.1	89.3±0.2	93.6±0.0	95.0±0.2
แบบเชื่อมขวาง	59.0±0.4	90.4±0.2	91.7±0.2	94.9±0.2	96.9±0.1
แบบคอมพอสิต	46.4±0.4	70.5±0.1	87.7±0.1	89.3±0.3	91.3±0.3

3. ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ตารางที่ ค-3 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง เชื่อมขวาง และคอมพอสิต

ความยาวของ เมมเบรน (ซม.)	ความดันที่ เป็นแรงขับ (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	แบบไม่เชื่อมขวาง	แบบเชื่อมขวาง	แบบคอมพอสิต
		ค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง)		
20	10	192.0±2.1	12.8±0.5	7,276.0±157.8
	20	263.9±1.0	35.6±0.9	8,567.3±228.0
	30	319.7±2.1	60.0±1.8	10,251.8±327.1
	40	346.0±2.0	79.9±2.0	12,432.2±388.0
	50	372.4±4.6	102.4±2.2	15,726.1±464.3
60	10	8.7±0.3	3.7±0.1	1,069.2±8.2
	20	20.5±0.2	7.2±0.0	1,221.4±10.4
	30	35.9±0.6	11.6±0.5	1,320.2±7.6
	40	47.1±0.5	14.8±0.1	1,446.2±14.6
	50	60.8±1.3	17.9±0.6	1,575.5±20.7
100	10	4.1±0.1	1.7±0.1	599.3±5.9
	20	5.7±0.1	2.6±0.0	643.1±6.6
	30	11.6±0.5	3.9±0.1	737.0±6.7
	40	14.4±0.4	4.9±0.2	787.5±12.6
	50	17.6±0.6	5.9±0.2	855.4±9.3

ตารางที่ ค-4 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง และเชื่อมขวาง โดยมี Spacer เป็นผ้าสปันปอนด์และตาข่ายมุ้งลวด ยาว 20 ซม. แทรกอยู่ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ความยาวของ เมมเบรน (ซม.)	ความดันที่ เป็นแรงขับ (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	แบบไม่เชื่อมขวาง		แบบเชื่อมขวาง	
		ผ้าสปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวด	ผ้าสปันปอนด์	ตาข่ายมุ้งลวด
		ค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง)			
20	10	2,791.3±30.2	6,494.6±209.8	188.4±0.9	438.9±4.3
	20	4,005.6±46.9	8,640.9±173.9	626.5±12.5	976.9±50.1
	30	5,325.8±112.9	11,219.1±312.5	1,120.4±16.1	2,085.8±175.1
	40	8,054.0±158.3	13,357.6±201.6	1,628.0±25.6	2,913.3±149.5
	50	10,390.4±383.8	17,584.0±893.5	2,270.6±47.8	3,818.0±44.2
60	10	201.2±2.5	307.7±0.7	57.1±0.5	111.6±1.2
	20	349.7±10.3	445.6±7.2	145.1±2.4	150.8±1.2
	30	523.3±6.4	638.4±13.8	228.4±2.1	217.2±1.4
	40	662.6±10.8	823.5±7.2	333.4±9.8	258.1±0.6
	50	870.5±18.4	1,063.6±27.9	436.9±7.0	319.4±2.2
100	10	35.3±0.2	63.5±0.4	16.7±0.2	31.4±0.5
	20	49.1±0.4	97.4±0.8	28.0±0.3	42.7±0.5
	30	57.1±0.7	156.6±5.2	38.5±0.8	60.4±1.6
	40	76.2±1.1	202.7±7.0	53.4±0.9	57.9±1.3
	50	90.9±1.6	262.7±10.5	65.1±2.3	97.1±1.2

ตารางที่ ค-5 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนแบบเชื่อมขวาง ยาว 100 ซม. โดยมี Spacer ฝ้าสปันปอนด์ แทรกอยู่ในมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียว

ความยาวของ ฝ้าสปันปอนด์ (ซม.)	ความดันที่เป็นแรงขับ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	แบบไม่เชื่อมขวาง
		ค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง)
20	10	16.7±0.2
	20	28.0±0.3
	30	38.5±0.8
	40	53.4±0.9
	50	65.1±2.3
60	10	129.6±1.0
	20	237.5±3.3
	30	342.1±5.2
	40	456.6±11.6
	50	598.8±5.5
100	10	900.8±13.5
	20	1,408.5±39.2
	30	1,943.3±57.5
	40	2,681.3±186.0
	50	3,364.2±150.8

4. คุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี spacer ยาว 20 ซม.

ตาราง ค-6 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำหลังการบำบัด					
	ไม่เชื่อมขวาง					
	ผ้าสปันปอนด์			ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก		
	20 ซม.	60 ซม.	100 ซม.	20 ซม.	60 ซม.	100 ซม.
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	3.4 ± 0.2	2.9 ± 0.2	2.3 ± 0.1	3.5 ± 0.2	3.0 ± 0.1	2.4 ± 0.2
ของแข็งระเหยง่าย (ก./ล.)	2.8 ± 0.1	1.9 ± 0.1	1.0 ± 0.1	2.9 ± 0.2	2.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1
ค่าซีโอดี (ก./ล.)	1.7 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.2	1.7 ± 0.1	1.4 ± 0.2	1.1 ± 0.1
ค่าพีเอช	7.9 ± 0.0	7.7 ± 0.0	7.6 ± 0.0	7.8 ± 0.0	7.7 ± 0.0	7.6 ± 0.0
ค่าทีเคเอ็น (ก./ล.)	0.7 ± 0.0	0.6 ± 0.0	0.4 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.6 ± 0.0	0.5 ± 0.0

ตาราง ค-7 คุณภาพน้ำหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยมอดูลแบบม้วนเป็นเกลียวแบบมี spacer ยาว 20 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำหลังการบำบัด					
	เชื่อมขวาง					
	ผ้าสปันปอนด์			ตาข่ายมุ้งลวดพลาสติก		
	20 ซม.	60 ซม.	100 ซม.	20 ซม.	60 ซม.	100 ซม.
ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)	2.0 ± 0.1	1.8 ± 0.1	1.4 ± 0.1	2.1 ± 0.0	2.0 ± 0.1	1.4 ± 0.1
ของแข็งระเหยง่าย (ก./ล.)	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.3 ± 0.0
ค่าซีโอดี (ก./ล.)	0.8 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.5 ± 0.1
ค่าพีเอช	7.4 ± 0.0	7.3 ± 0.0	7.2 ± 0.0	7.4 ± 0.0	7.3 ± 0.0	7.2 ± 0.0
ค่าทีเคเอ็น (ก./ล.)	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.2 ± 0.0

5. การศึกษาอายุการใช้งานของผ้าสปันปอนด์ 100 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง 100 ซม.

ตารางที่ ค-8 ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าซีไอดีทั้งหมดของผ้าสปันปอนด์ 100 ซม. ม้วนเข้ากับเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง 100 ซม.

วันที่	ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสีย ที่ความดัน 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ลบ.ชม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร)	ค่าซีไอดี (ก./ล.)
1	1,398.1±30.7	0.28±0.10
2	1,274.6±4.7	0.32±0.08
3	1,228.7±14.6	0.32±0.19
4	1228.6±8.6	0.25±0.10
5	1,219.1±10.8	0.36±0.13
6	1,161.2±11.3	0.26±0.10
7	1,107.0±10.5	0.33±0.08
8	1,053.3±6.3	0.30±0.10
9	1,042.2±9.0	0.33±0.08
10	994.5±5.7	0.33±0.15
11	942.9±5.7	0.37±0.13
12	900.6±4.3	0.38±0.08
13	776.5±7.9	0.41±0.09
14	763.6±7.5	0.38±0.08
15	713.4±4.4	0.30±0.10
16	715.4±6.3	0.33±0.08
17	634.3±10.1	0.37±0.18
18	624.6±4.9	0.38±0.08
19	623.6±5.0	0.34±0.12
20	599.3±4.4	0.38±0.19

ตารางที่ ค-9 ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าซีไอดีทั้งหมดของผ้าสปันบอนด์ 100 ซม. ม้วนเข้ากับ
 เมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง 100 ซม. (ต่อ)

วันที่	ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์จากการบำบัดน้ำเสีย ที่ความดัน 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ลบ.ซม.ต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร)	ค่าซีไอดี (ก./ล.)
21	573.0±6.4	0.38±0.14
22	582.8±5.2	0.37±0.13
23	522.8±5.6	0.48±0.17
24	497.9±4.8	0.52±0.08
25	493.8±2.5	0.50±0.08
26	491.6±4.2	0.64±0.10
27	493.5±5.4	0.60±0.10
28	492.2±2.5	0.62±0.09
29	488.9±4.6	0.65±0.08
30	488.6±6.3	0.69±0.12

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติธัช ชื่นสกุลพงศ์ เกิดวันที่ 3 มิถุนายน 2531 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษา ต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2556 และเข้าร่วมการประชุม วิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 The 23rd International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICHE 2013) ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออดคิด จ.ขอนแก่น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY