

การกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้งด้วยกระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-

อัลตราฟิลเตรชัน



นายชาญชนะ จิตตะโสภี

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Removal of PVA from desizing wastewater using a combined coagulation
and ultrafiltration system

Mr. Chanchana Jittasopee



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

ชาญชนะ จิตตะโสภี : การกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้งด้วยกระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชัน (Removal of PVA from desizing wastewater using a combined coagulation and ultrafiltration system) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล, 145 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน จากการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ 500 mg/L ที่ความเข้มข้นสารโพลีเอทิลีนออกไซด์ไม่มีประจุ (Poly ethylene oxide) 0.1 mg/L ที่ค่าพีเอช 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด เท่ากับ 21.90% และมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และค่าซีไอดี เท่ากับ 12.5% และ 36.59% ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ 10.5 g/L และเมื่อศึกษาน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งพบว่าปริมาณสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1,000 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอเท่ากับ 14.83% และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น และค่าซีไอดีเท่ากับ 86.60% และ 8.99% ตามลำดับ

กระบวนการโคแอกกูเลชันจึงเป็นเพียงการบำบัดขั้นต้นเพื่อลดความขุ่นก่อนเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนเพื่อลดการอุดตันที่ผิวเมมเบรน การศึกษาระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนเพื่อกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์โดยไม่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรนเท่ากับ 2 bar และที่ขนาดรูพรุน 150 kDa มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร พีวีเอมากที่สุดเท่ากับ 90.25% และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ค่าซีไอดี เท่ากับ 70.59% และ 83.44% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ 400 mg/L เมื่อศึกษากระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชันในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง โดยใช้ $MgCl_2$ เป็นสารสร้างตะกอน จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด คือที่ขนาดรูพรุน 150 kDa

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770398321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: POLYVINYL ALCOHOL, DESIZING WASTEWATER, COAGULATION, ULTRAFILTRATION MEMBRANE

CHANCHANA JITTASOPEE: Removal of PVA from desizing wastewater using a combined coagulation and ultrafiltration system. ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 145 pp.

This research aims to remove polyvinyl alcohol (PVA) from synthetic PVA wastewater and desizing wastewater by coagulation and ultrafiltration membrane processes. From the investigation, it was found that the best coagulant in this research was $MgCl_2$ (Magnesium chloride) at dosage of 500 mg/L with 0.1 mg/L nonionic polymer (Poly ethylene oxide) at pH 8. The highest PVA removal efficiency could be obtained from the coagulation process about 21.90%, also for turbidity and COD removal efficiencies approximately 12.5% and 36.95% respectively, when the feed was 10.5 g/L synthetic PVA wastewater. When the desizing wastewater was the feed wastewater, the optimal concentration of $MgCl_2$ as coagulant was 1,000 mg/L, resulting in the percentages of PVA, turbidity and COD removal efficiencies about 14.83, 86.60 and 8.99 respectively.

From the results, it can be suggested that coagulation can be the pretreatment to reduce membrane fouling from turbidity before the ultrafiltration process. For the investigation using ultrafiltration membrane for PVA removal in synthetic PVA wastewater without coagulation showed that transmembrane pressure at 2 bar with membrane pore size of MWCO 150 kDa could yield the highest PVA removal with the percentage PVA removal efficiency about 90.25%. The percentages of turbidity and COD removal efficiencies were about 70.59% and 83.44% respectively in 400 mg/L synthetic PVA wastewater. Moreover with desizing wastewater, the combined coagulation using $MgCl_2$ as coagulant with ultrafiltration membrane, it was found that the membrane pore size of MWCO 150 kDa was the best system for PVA removal in desizing wastewater.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทดลองและวิจัย รวมไปถึงแนวทางในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์และให้ความเอาใจใส่ในขณะทำการทดลองจนงานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่มีส่วนให้คำปรึกษาแก่นิสิตในเรื่องของงานวิจัย ขอขอบพระคุณประธานการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน และอาจารย์กรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์ และกรรมการภายนอก ดร.ธนากร เมธาธรรม ที่ช่วยชี้แนะในเรื่องของการเขียนเล่มและปรับปรุงแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเสร็จสิ้น

ขอขอบพระคุณคุณครูจันทวรรณ ต้นเจริญ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในเรื่องของวิธีการวิเคราะห์การทดลอง รวมไปถึงให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของอุปกรณ์การทดลองและสารเคมีต่างๆ ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดาของผู้วิจัยที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจจนสามารถทำการทดลองและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมพอกย้อม.....	4
2.1.1 ที่มาและความสำคัญของอุตสาหกรรมพอกย้อม.....	4
2.1.2 ผลกระทบของน้ำเสียอุตสาหกรรมพอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม.....	8
2.1.3 อุตสาหกรรมพอกย้อมในประเทศไทย.....	9
2.1.4 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมพอกย้อม.....	11
2.2 สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ หรือ สารพีวีเอ (Poly vinyl alcohol, PVA).....	16
2.2.1 ที่มาและความสำคัญ.....	16
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารพีวีเอ.....	18
2.2.3 ปัญหาน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารพีวีเอ.....	18
2.2.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสารพีวีเอเป็นองค์ประกอบ.....	19

2.3	กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation).....	19
2.4	กระบวนการเมมเบรน (Membrane process).....	25
2.4.1	ทฤษฎีของเมมเบรน.....	25
2.4.2	กระบวนการของเมมเบรน.....	32
2.4.3	การทำความสะอาดเมมเบรนและการล้างย้อน (Membrane Cleaning and Backwashing).....	44
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	53
3.1	แผนการวิจัย.....	53
3.2	คุณสมบัติน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	54
3.3	รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยอัลตราฟิลเตรชัน.....	54
3.4	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	55
3.5	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์.....	62
3.6	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	62
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	64
4.1	ผลการศึกษาชนิด ปริมาณสารสร้างตะกอน และความเข้มข้นสารโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง.....	64
4.1.1	น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์.....	64
4.1.1.1	การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.05 mg/L.....	64
4.1.1.2	การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/L.....	69
4.1.2	น้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (Desizing wastewater).....	75
4.1.2.1	การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.05 mg/L.....	75
4.1.2.2	การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/L.....	77

4.2 ผลการศึกษาการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	81
4.2.1 น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์.....	81
4.2.1.1 ผลของความดันทรานส์เมมเบรน.....	83
4.2.1.2 การใช้เมมเบรนขนาดรูพรุน 150 kDa สำหรับกำจัดสารพีวีเอ.....	90
4.2.2 น้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง.....	92
4.2.2.1 ขนาดรูพรุน 150 kDa.....	93
4.2.2.2 ขนาดรูพรุน 300 kDa.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	114
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	114
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	115
.....	116
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	145

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม ลำดับที่ 22(1), 22(2) และ 22(3) ก่อนปล่อยสู่ สาธารณะ	10
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารฟิวเอ	18
ตารางที่ 2.3 ข้อดี-ข้อเสียของเมมเบรนอนินทรีย์เทียบกับเมมเบรนอินทรีย์.....	27
ตารางที่ 2.4 ระยะเวลาในการตกตะกอนของอนุภาคแต่ละขนาด	33
ตารางที่ 2.5 ระดับน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรนประเภทต่างๆ	34
ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้งานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน.....	36
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้ง (Desizing).....	54
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเมมเบรน.....	54
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 1.1	56
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 1.2	57
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 2.1.1	59
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 2.1.2	60
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 2.2	61
ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์และวิธีที่ใช้ในการทดลอง	62
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำเสียฟิวเอสังเคราะห์	64
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง.....	75
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งก่อนและหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน	93

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการในอุตสาหกรรมฟอกย้อม	8
รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดขั้นต้น	12
รูปที่ 2.3 ระบบเอเอส (Activated sludge).....	14
รูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัดขั้นสูง a). ระบบอิลเล็กโทรไดอะไลซิส b). ระบบรีเวอร์สออสโมซิส	15
รูปที่ 2.5 สารเคลือบเส้นด้ายที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	17
รูปที่ 2.6 กระบวนการนำสารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จากกระบวนการลอกแบ่งกลับมาใช้ใหม่.....	17
รูปที่ 2.7 แบบจำลอง Electric double layer.....	20
รูปที่ 2.8 เกณฑ์การเลือกกระบวนการแยก.....	26
รูปที่ 2.9 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน	28
รูปที่ 2.10 ลักษณะโมดูลแบบแผ่น	28
รูปที่ 2.11 ลักษณะโมดูลแบบเส้นใยกลวง	29
รูปที่ 2.12 ลักษณะโมดูลแบบท่อหมุน.....	30
รูปที่ 2.13 ลักษณะโมดูลแบบท่อ.....	30
รูปที่ 2.14 ลักษณะการไหลผ่านโมดูลเมมเบรน แบบ Cross flow filtration (a) และแบบ In-line filtration (b)	31
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	53
รูปที่ 3.2 ผังการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลองขนาดทดสอบ (Bench scale).....	55
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองที่ 1.1	56
รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองที่ 1.2	58
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลองที่ 2.1.1	59
รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลองที่ 2.1.2	60
รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองที่ 2.2	61

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน.....	65
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่น กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน	65
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน	66
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน.....	66
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน	67
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับค่าพีเอช.....	67
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับค่าพีเอช.....	68
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับค่าพีเอช	68
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับค่าพีเอช.....	69
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน.....	70
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ความขุ่น กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน.....	70
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน	71
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน...	71
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน	71
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับค่าพีเอช.....	72
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับค่าพีเอช	73
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับค่าพีเอช	73
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับค่าพีเอช.....	73
รูปที่ 4.19 ผลของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ 0.05 mg/L (a.) และ 0.1 mg/L (b.) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่มีผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม.....	74
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	76

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	76
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	76
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	77
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	77
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นสารสร้าง ตะกอน.....	78
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	78
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	78
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	79
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน.....	79
รูปที่ 4.30 ผลของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ.....	80
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความถี่สั่น กับขนาดอนุภาคก่อน.....	80
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับระยะเวลาในการเดินระบบ UF ที่ความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่างๆ.....	82
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่ กับความเข้มข้น น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์.....	82
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับความเข้มข้นของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์.....	83
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	83
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา.....	84
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	84
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	85
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	85
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา.....	86

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา	86
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	87
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	87
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	88
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา	88
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	89
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับค่าความดันทรานส์เมมเบรน.....	89
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรน กับค่าความดันทรานส์เมมเบรน	90
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับระยะเวลาในการเดินระบบ UF ที่ความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่างๆ	91
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่ กับความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์.....	91
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับความเข้มข้นของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์.....	92
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	93
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	94
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป่งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	94
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	95
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	95
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	96

รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	96
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	97
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	97
รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	98
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	98
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	99
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	99
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	100
รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	100
รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	101
รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	101
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	102
รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	102
รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	103
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	103
รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	104
รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	104
รูปที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	105
รูปที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	105
รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	106

รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	106
รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	107
รูปที่ 4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา.....	107
รูปที่ 4.81 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา	108
รูปที่ 4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา.....	108
รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา.....	109
รูปที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับค่าความดันทรานส์เมมเบรน ...	110
รูปที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอก แป้งต่อค่าซีไอดี กับความดันทรานส์เมมเบรน.....	110
รูปที่ 4.86 ประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอที่ขนาดรูพรุน 150 และ 300 kDa ในน้ำเสียพีวีเอ สังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง.....	111
รูปที่ 4.87 (a) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (b) ผลการวิเคราะห์ FT- IR ของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน (c) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งหลังกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีบทบาทสำคัญมากมาย เนื่องจากเสื้อผ้า หรือ เครื่องนุ่งห่ม นั้นเป็นหนึ่งในปัจจัยสี่ที่มีความจำเป็นต่อมนุษย์ ทำให้มีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการผลิตสิ่งทอต่าง ๆ มีเกิดขึ้นอย่างมากมาย อุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญคืออุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนผ้าดิบไปเป็นวัสดุที่นำไปผลิตต่อไปได้ กระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรมฟอกย้อมก็มีหลายกระบวนการ เช่น การเตรียมผ้า การย้อม การพิมพ์ และการตกแต่งสำเร็จ โดยกระบวนการเตรียมผ้า ประกอบไปด้วยหลายกระบวนการ กระบวนการหนึ่งที่สำคัญคือ กระบวนการลอกแป้ง เป็นกระบวนการนำสิ่งทอมาต้มในน้ำร้อนเพื่อละลายแป้งสังเคราะห์ หรือ poly vinyl alcohol (PVA) เพื่อที่จะนำสิ่งทอไปสู่กระบวนการย้อมต่อไป ซึ่งสารพีวีเอถูกนำมาใช้เป็นสารที่เคลือบเส้นด้ายในสิ่งทอต่างๆ แทนการใช้แป้ง เนื่องจากแป้งไม่ละลายน้ำ ดังนั้นกระบวนการลอกแป้งจึงต้องใช้สารออกซิไดซิงช่วยในการลอกแป้งออกจากสิ่งทอ ส่งผลให้น้ำเสียจากการลอกแป้งมีค่าบีโอดีและมีความเป็นพิษสูง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำสารพีวีเอมาใช้ในกระบวนการเคลือบเส้นด้ายแทนแป้ง โดยสารพีวีเอมีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายแป้ง ละลายน้ำได้ ไม่มีกลิ่น น้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้งที่มีสารพีวีเอเป็นองค์ประกอบจะมีค่าซีโอดีและอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์สัตว์น้ำและปัญหาน้ำเน่าเสีย ดังนั้นน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้งจึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

การบำบัดน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งในปัจจุบันใช้กระบวนการบำบัดแบบชีวภาพด้วยระบบตะกอนเร่ง หรือ Activated Sludge แต่น้ำเสียหลังการบำบัดด้วยระบบดังกล่าวยังคงมีค่า COD สูงกว่ามาตรฐาน เนื่องจากสารพีวีเอเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สนใจศึกษากระบวนการโคแอกูเลชันร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์ในน้ำเสียที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง $10^{-3} - 10^{-6}$ mm. โดยการเติมสารสร้างตะกอน (coagulants) ลงในน้ำเสียเพื่อทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ทำให้อนุภาคดังกล่าวสามารถจับตัวรวมกันเป็นก้อนและตกตะกอนออกมาได้ ซึ่งสารที่ใช้เป็นตัว coagulants โดยทั่วไปจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ และประเภทที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (เน่งน้อย วิจิตร จรรยากุล, 2543)

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน เป็นกระบวนการแยกสารจำพวกคอลลอยด์ โปรตีน หรือ ไวรัสต่างๆ ด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ $0.001 - 0.1 \mu\text{m}$. (Anis, Kayar และ Eren, 2007) ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการทำเมมเบรนก็มีหลายชนิด แต่ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาการใช้งานระบบ ceramic ultrafiltration membrane เนื่องจากสามารถทนสารเคมี และทนความร้อนได้ดี รวมไปถึงมีค่าอัตราการซึมผ่านที่สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นที่เป็น polymer (Barredo-Damas และคณะ, 2010)

งานวิจัยนี้จะดำเนินการศึกษาระบบ coagulation ร่วมกับกระบวนการ ultrafiltration ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารพีวีเอเป็นองค์ประกอบจากอุตสาหกรรมพอกย้อม โดยมีการศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมร่วมกับการใช้สารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ ในการเติมลงในน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้งก่อนเข้าสู่ระบบ ultrafiltration ซึ่งจะช่วยลดการเกิด fouling ที่ตัวเมมเบรนได้ (Choo, Choi และ Hwang, 2007) โดยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการ coagulation และ ultrafiltration membrane จะทำให้ค่าซีไอดีในน้ำเสียลดลง จึงสามารถนำน้ำเสียดังกล่าวไปหมุนเวียนใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆ หรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน (coagulants) ร่วมกับผลของความเข้มข้นของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุต่อการบำบัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

2. ศึกษาผลของการใช้ ceramic ultrafiltration membrane ในการแยกสารพีวีเอออกจากน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง โดยพิจารณาผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อระบบ อันได้แก่ ความดันในการกรอง และขนาดรูพรุนของเมมเบรน

3. ศึกษาประสิทธิภาพในการเดินระบบร่วม coagulation และ ultrafiltration membrane ในระดับชุดทดสอบ (Bench scale) ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งและค่าอัตราการกรองน้ำที่ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สารสร้างตะกอน (coagulants) ที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ PACl (Polyaluminium chloride), $AlCl_3$ (Aluminium chloride) และ $MgCl_2$ (Magnesium chloride) สำหรับสารโพลีเมอร์เลือกใช้ชนิดไม่มีประจุ คือ polyethylene oxide

2. กระบวนการของเมมเบรนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ultrafiltration โดยใช้วัสดุที่เป็น ceramic membrane โดยจะศึกษาในชุดทดลองขนาดทดสอบ (Bench scale) โดยใช้โมดูลชนิด Flat sheet

3. น้ำเสียที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภทคือ น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (Desizing) จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอยล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเลือกชนิดและปริมาณ รวมไปถึงค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนในกระบวนการ coagulation สำหรับช่วยลดการเกิด membrane fouling ในระบบ ultrafiltration

2. สามารถกำจัดสารพีวีเอออกจากน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (Desizing) เพื่อลดค่าความสกปรกในรูปค่าซีไอดี ของน้ำทิ้ง และส่งเสริมการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

2.1.1 ที่มาและความสำคัญของอุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเป็นอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการเปลี่ยนวัสดุประเภทเส้นด้ายที่เป็นองค์ประกอบในสิ่งทอไปเป็นวัสดุสำเร็จรูปโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีการใช้น้ำและสารเคมีที่เป็นสารเชิงซ้อนเป็นวัตถุดิบหลักส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำเสียที่มีค่าความเป็นพิษสูงและย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อพืชและสัตว์ (Verma, Dash และ Bhunia, 2012) กระบวนการในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม (Patel และ Vashi, 2015)

2.1.1.1 กระบวนการผลิตแบบแห้ง (dry process)

เป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ กระบวนการผลิตแบบแห้งประกอบไปด้วย

1. กระบวนการปั่นและผสม (blending and mixing)
2. กระบวนการสาวใย (carding)
3. กระบวนการแยกเส้นใย (combing)
4. กระบวนการปั่นด้าย (spinning)
5. กระบวนการทอ (weaving)
6. กระบวนการถัก (knitting)

2.1.1.2 กระบวนการผลิตแบบเปียก (wet process)

เป็นกระบวนการผลิตที่ต้องใช้น้ำในแต่ละกระบวนการ กระบวนการผลิตแบบเปียกประกอบไปด้วย

1. การเผาขน (singeing)

เป็นกระบวนการกำจัดเส้นด้ายส่วนเกินที่โผล่ออกมาจากสิ่งทอด้วยกระบวนการเผาเส้นด้ายส่วนเกินนี้จะทำให้สิ่งทอไม่เรียบเนียนและทำให้สิ่งทอไม่มันเงา ซึ่งการเผานี้จะช่วยกำจัดเส้นด้ายส่วนเกินและทำให้สิ่งทอเรียบเนียนมากขึ้น นอกจากนี้การเผาขนในผ้าพิมพ์จะทำให้ลายพิมพ์มีความคมชัด โดยเฉพาะในการพิมพ์ลายละเอียด ถ้ามีเส้นด้ายส่วนเกินโผล่ออกเหนือสิ่งทอจะทำให้เกิดการดูดซึมสีและแผ่กระจายไปบนผ้าทำให้ลายดูไม่คมชัด

2. การลอกแป้ง (Desizing)

กระบวนการลอกแป้งเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนรวมไปถึงเส้นด้ายที่เกิดจากกระบวนการเผาขน กระบวนการเคลือบเส้นใยสังเคราะห์ในสิ่งทอมักจะใช้สารที่สามารถละลายน้ำได้แทนแป้ง เพื่อให้ง่ายต่อการกำจัดสารเคลือบเส้นด้ายด้วยการต้มในน้ำร้อนหรือการซักล้าง เช่น คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (CMC) หรือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นต้น การกำจัดสารเคลือบเส้นด้ายก่อนกระบวนการขจัดสิ่งสกปรก (Scouring) มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อลดคุณสมบัติการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใยรวมไปถึงป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานของเส้นใยทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการขจัดสิ่งสกปรก ซึ่งในบางครั้งอาจมีการใช้กรดในการกำจัดสารเคลือบเส้นด้ายด้วยเช่นกัน

3. การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

เส้นใยที่ผ่านจากกระบวนการลอกแป้งมักมีสารจำพวกไขมัน, สารหล่อลื่น หรือแว็กซ์ เป็นต้น ส่งผลให้เส้นใยมีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำและทำให้การดูดติดสีของเส้นใยในสิ่งทอไม่สม่ำเสมอได้ โดยสารปนเปื้อนดังกล่าวจะถูกกำจัดโดยใช้สารเคมีที่มีความเป็นด่าง เช่น โซดาไฟ, โซดาแอช, โซเดียมซัลไฟด์ หรือ โซเดียมเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น วิธีการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในเส้นด้ายจะต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเส้นใยแต่ละชนิด รวมไปถึงปริมาณและชนิดของสิ่งปนเปื้อน โดยปกติแล้วเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งปนเปื้อนมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ดังนั้นกระบวนการขจัดสิ่งสกปรกจึงต้องมีวิธีการที่ยุ่งยากมากกว่า

4. การฟอกขาว (Bleaching)

หลังจากกระบวนการขจัดสิ่งสกปรก กระบวนการต่อมาคือกระบวนการฟอกขาวเพื่อกำจัดสีในธรรมชาติที่ติดมากับสิ่งทอ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้มีหลายชนิด เช่น โซเดียมคลอไรด์, กรดฟอร์มิก, กรดซัลฟูริก, โซดาไฟ เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้กันคือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กระบวนการฟอกขาวเริ่มจากการล้างสิ่งทอด้วยน้ำตามด้วยกรดเจือจางและโซเดียมไบซัลเฟต เพื่อกำจัดคลอรีนและต่างตามด้วยการฟอกขาวโดยการล้างด้วยสบู่และใช้สารฟอกขาวเพื่อให้เส้นใยในสิ่ง

ทอมีความขวมมากขึ้น น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกขาวจะเป็นสารซักล้างและสารฟอกขาว เป็นต้น

5. การชุบมัน (Mercerization)

กระบวนการชุบมันเป็นการชุบสิ่งทอในสารเคมีจำพวกโซดาไฟตามด้วยการล้างน้ำในปริมาณมากด้วยระบบสวนกระแส (countercurrent) ซึ่งการชุบมันจะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงและทำให้เส้นด้ายมีความมันเงามากขึ้น การชุบมันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การชุบมันด้วยโซดาไฟ และการชุบมันด้วยแอมโมเนียเหลว

6. การย้อมสี (Dyeing)

การย้อมสีแต่ละชนิดนอกจากจะทำให้สิ่งทอมีสีสันสวยงามแล้วคุณสมบัติของสีที่ย้อมติดสิ่งทอก็มีความสำคัญคือต้องมีความคงทนต่อแดด และสารเคมีประเภทสารซักล้าง เช่น สบู่หรือน้ำยาซักแห้ง จากกระบวนการย้อมสีน้ำเสียที่เกิดขึ้นก็จะเป็นสีย้อมประเภทต่างๆ ขึ้นอยู่กับสีที่ใช้ในกระบวนการย้อม โดยได้มีการจำแนกสีออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

1. สีย้อมแว็ด (Vat dye)
2. สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dye)
3. สีย้อมแอซิด (Acid dye)
4. สีย้อมเบสิก (Basic dye)
5. สีย้อมไดเรกต์ (Direct dye)
6. สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dye)
7. สีย้อมแนปทอล (Naphthol dye)
8. สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dye)
9. สีย้อมอะโซอิก (Azoic dye)
10. สีย้อมฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent dye)
11. สีย้อมอินดิโก (Indigo dye)

7. การพิมพ์ (Printing)

เป็นการทำให้สี หรือสารเคมีติดลงบนเส้นด้ายในสิ่งทอ ทำให้ลวดลายบนผ้า เป็นไปตามแบบแม่พิมพ์ การพิมพ์มี 3 วิธี คือ พิมพ์โดยตรงลงบนผ้า, พิมพ์แบบรีซิส และพิมพ์แบบ ดิสชาร์จ

8. การตกแต่งสำเร็จ (Finishing)

ประกอบด้วย การล้างสิ่งทอเพื่อกำจัดสีส่วนเกินจากกระบวนการย้อมสี และมีการปรับปรุงคุณภาพสิ่งทอให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น การใส่สารหล่อลื่นเพื่อเพิ่มความ มั่นคงให้กับผ้าหรือการใช้สารเรซินสังเคราะห์เพื่อให้สิ่งทอทนไฟ ทนสารเคมี เป็นต้น โดยน้ำเสียจาก กระบวนการนี้จะเป็นสารจำพวกสีย้อม หรือสารที่เติมแต่งคุณภาพของสิ่งทอ กระบวนการผลิตสิ่งทอ แสดงดังรูปที่ 3.1 การตกแต่งสำเร็จสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทโดยจำแนกตามกรรมวิธีการตกแต่ง ดังนี้ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

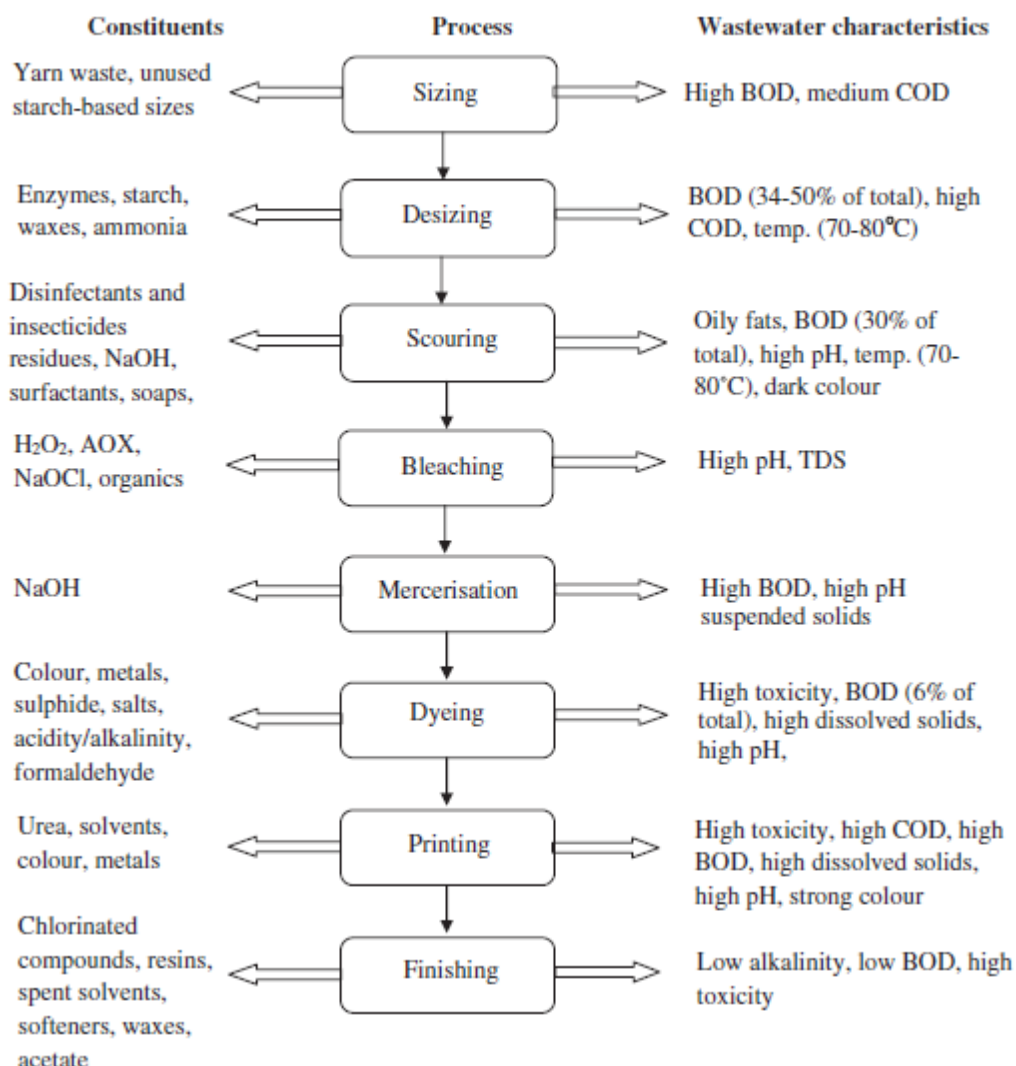
8.1 การตกแต่งสำเร็จด้วยวิธีเชิงกล

การตกแต่งด้วยวิธีเชิงกล เป็นการตกแต่งสิ่งทอโดยใช้เครื่องจักรใน การผลิตเพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น ให้ผ้ามีความมันเงา, ให้ผ้ามีความนุ่ม หรือ ควบคุม การหดตัวของผ้า เป็นต้น

8.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี

เป็นการตกแต่งสิ่งทอให้มีคุณสมบัติตามต้องการโดยใช้สารเคมีทั้งที่เป็น ธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือสารเคมีสังเคราะห์ เช่น สารพีวีเอ เรซิน ซิลิโคน สารกันน้ำ สารตกแต่ง ผ้านุ่ม ลาเท็กซ์ เป็นต้น

เนื่องจากกระบวนการผลิตแบบเปียกมีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบหลัก ผลที่ตามมาคือของเสียที่ เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (Verma, Dash และ Bhunia, 2012)

2.1.2 ผลกระทบของน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

สามารถจำแนกผลกระทบได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. ผลกระทบต่อสัตว์น้ำการปนเปื้อนของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมในแหล่งน้ำผิวดินมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำทั้งในเรื่องของขนาด, อายุ รวมไปถึงสปีชีส์ของสัตว์น้ำ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแหล่งน้ำ (เช่น ค่าพีเอช, อุณหภูมิ, ความกระด้าง, ค่าความเป็นด่างทั้งหมด, ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น) ล้วนมีความสำคัญเนื่องจากมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ นอกจากนี้สารเคมี

บางชนิดในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมอาจมีการสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อสัตว์น้ำ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารและสายใยอาหาร รวมไปถึงผลกระทบต่อมนุษย์ได้เช่นกัน

2. ผลกระทบต่อมนุษย์ สารเคมีบางชนิดที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ทำให้เกิดการระคายเคือง/อักเสบ การกัดกร่อนเนื้อเยื่อของร่างกาย และอาจรุนแรงจนก่อให้เกิดโรคมะเร็งหรือการกลายพันธุ์ เป็นต้น นอกจากนี้สารเคมีประเภทสีย้อมก็เป็นปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งนอกจากจะทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำแล้ว ยังมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ที่ใช้แหล่งน้ำเป็นแหล่งอุปโภคบริโภคด้วยเช่นกัน

3. ผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน สารเคมีบางชนิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมอาจมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียลดลงหรือสารบางชนิดที่เป็นสารประเภทกรดอาจกัดกร่อนเหล็กหรือคอนกรีตที่เป็นโครงสร้างของระบบบำบัดน้ำเสียทำให้เกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้กรดอาจทำปฏิกิริยากับสารประเภทสบู่ในน้ำเสียชุมชนเกิดเป็นกรดไขมันและฟอรัมตัวเป็นตะกอนลอย (scum) ซึ่งจะทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีความข้นเหนียวและรีดน้ำออกได้ยาก (dewatering)

2.1.3 อุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย

2.1.3.1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหน่วยงานต่างๆในประเทศไทย

มาตรฐานน้ำทิ้งปัจจุบันที่ควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ได้มีการกำหนดมาตรฐานโดยหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรมควบคุมมลพิษ, กรมชลประทาน และ กรมเจ้าท่า ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม ลำดับที่ 22(1), 22(2) และ 22(3) ก่อนปล่อยสู่
สาธารณะ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

ดัชนีวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้ง			
	กรมโรงงาน อุตสาหกรรม	กรมควบคุม มลพิษ	กรมชลประทาน	กรมเจ้าท่า
ค่าพีเอช	5.5 – 9.0	5.5 – 9.0	6.5 – 8.5	5 - 9
บีโอดี (มก./ล.)	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20 - 60
ซีโอดี (มก./ล.)	ไม่เกิน 400	ไม่เกิน 400	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 30	-
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	ไม่เกิน 100	ไม่เกิน 100	-	-
ไขมันและน้ำมัน (มก./ล.)	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 5	-
ปริมาณสี	ไม่เป็นที่พึง รังเกียจ	ไม่เป็นที่พึง รังเกียจ	ไม่เป็นที่พึง รังเกียจ	-

2.1.3.2 การติดตามและควบคุมมลภาวะจากโรงงานฟอกย้อมโดยเจ้าหน้าที่ของรัฐ

เจ้าหน้าที่รัฐที่ควบคุมในเรื่องของการจัดการสิ่งแวดล้อมในโรงงานฟอกย้อมต้องมีความรู้ความเข้าใจเทคโนโลยีของกระบวนการผลิต ระบบบำบัดน้ำเสียและการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมของโรงงานฟอกย้อมเป็นอย่างดี เพื่อที่จะได้ให้คำแนะนำกับผู้ประกอบการเมื่อมีปัญหาเกิดขึ้น ในการติดตามและควบคุมให้ผู้ประกอบการปฏิบัติตามแนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมในโรงงานฟอกย้อม โดยเฉพาะในด้านการจัดการของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตทั้งในรูปของแข็งและของเหลว เจ้าหน้าที่รัฐควรทำรายละเอียดของกิจกรรมที่ต้องติดตามและควบคุมดังนี้

- สภาพการทำงานโดยทั่วไปของโรงงาน
- กระบวนการผลิตที่ใช้
- วิธีป้องกันและควบคุมมลภาวะในกระบวนการผลิต

- ใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงได้หรือไม่
- ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต
- ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย
- ข้อมูลความถี่ สภาวะการเก็บตัวอย่าง และผลการวิเคราะห์

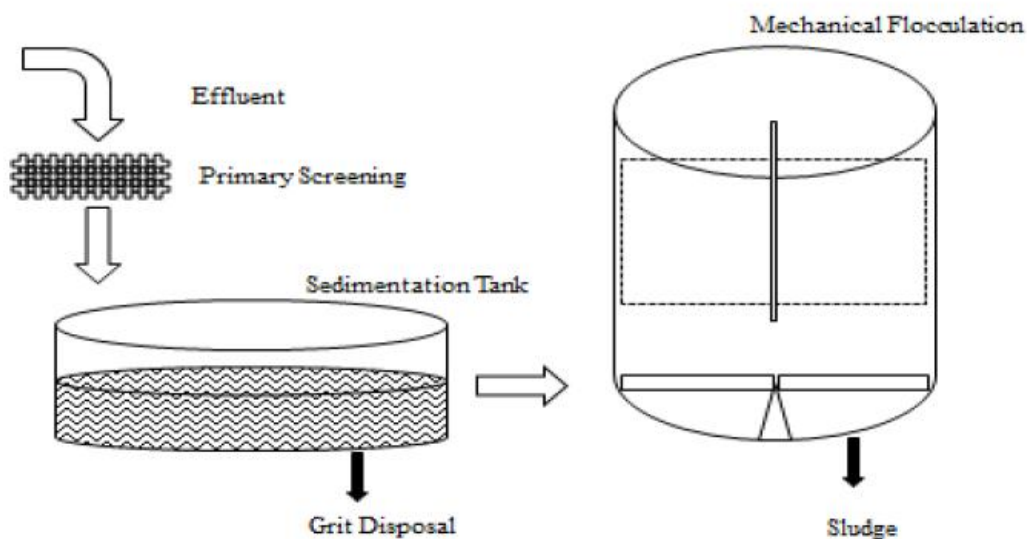
ทั้งนี้เจ้าหน้าที่รัฐต้องเก็บน้ำตัวอย่างจากโรงงานมาวิเคราะห์ 3 – 4 ครั้งต่อปี ขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือในการดำเนินการของโรงงาน โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าพีเอช (pH) ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) และ อุณหภูมิ

2.1.4 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

การบำบัดน้ำเสียประเภทอุตสาหกรรมฟอกย้อมแบ่งออกได้เป็น 3 กระบวนการ (Ghaly และคณะ, 2014)

2.1.4.1 การบำบัดขั้นต้น (Primary treatment)

การบำบัดขั้นต้นเป็นกระบวนการกำจัดสารแขวนลอย ไขมัน/น้ำมันกรวดทราย ที่ปนมากับน้ำเสียรวมไปถึงเส้นด้าย, เศษผ้า ด้วยตะแกรง ซึ่งตะแกรงจะแบ่งเป็น ตะแกรงหยาบ (ขนาดของรูตะแกรงมากกว่า 6 มิลลิเมตร) และ ตะแกรงละเอียด (ขนาดของรูตะแกรง 1.5-6 มิลลิเมตร) โดยตะแกรงหยาบสามารถดักจับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ เช่น กรวด หิน เป็นต้น ส่วนตะแกรงละเอียดสามารถดักจับสารแขวนลอยที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียได้ นอกจากตะแกรง ในกระบวนการบำบัดขั้นต้นยังมีปอดตกตะกอนซึ่งใช้ในการตกตะกอนสารแขวนลอยที่หลุดผ่านตะแกรงปนมากับน้ำเสีย แต่ถึงตกตะกอนไม่สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียได้ ดังนั้นจึงได้มีกระบวนการเติมสารเคมีที่ช่วยรวมอนุภาคคอลลอยด์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนแยกออกมาจากน้ำเสีย หรือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเสียได้ โดยสารเคมีที่นิยมใช้ เช่น สารส้ม ปูนขาว เป็นต้น กระบวนการบำบัดขั้นต้นแสดงดังรูปที่



รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดขั้นต้น (Ghaly และคณะ, 2014)

2.1.4.2 การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment)

เป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพเพื่อลดค่าบีโอดี (BOD) รวมไปถึงการกำจัดสารประเภทฟีนอล น้ำมัน หรือกำจัดสีที่ปนอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม การบำบัดทางชีวภาพมีทั้งแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic conditions) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic conditions) แบบใช้ออกซิเจน แบคทีเรียจะใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงานและเป็นธาตุอาหาร เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), น้ำ (H_2O) และสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) ส่วนแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2S) ซึ่งระบบการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้

2.1.4.2.1 ระบบบ่อเติมอากาศ

ประกอบไปด้วยถังขนาดใหญ่ที่มีความลึกประมาณ 2-6 เมตร ซึ่งรับน้ำเสียจากกระบวนการบำบัดขั้นต้น น้ำเสียที่เข้ามาจะมีการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศเป็นระยะเวลา 2-6

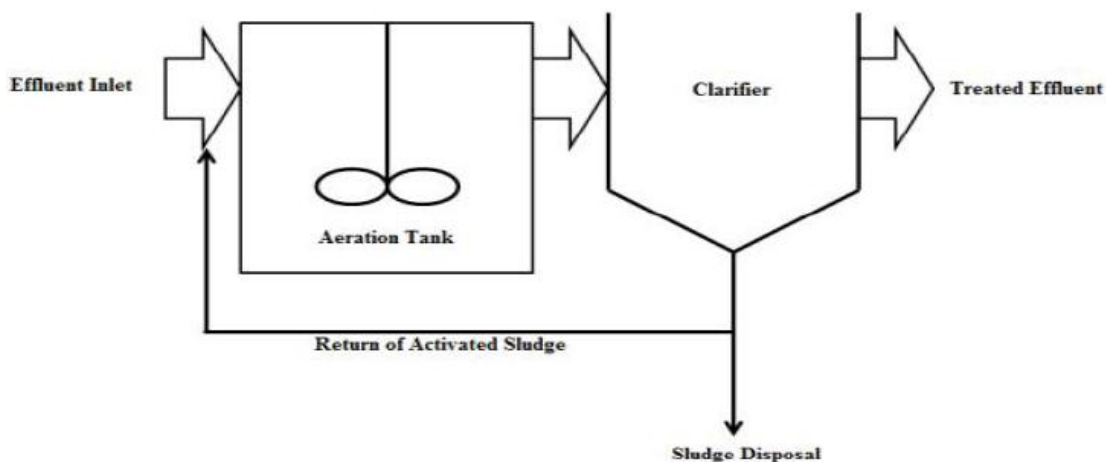
วัน โดยเครื่องเติมอากาศนอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำเสียแล้วยังเป็นการช่วยให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียในบ่อซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้อีกทางหนึ่ง ระบบบ่อเติมอากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัด BOD ได้ถึง 99% และยังสามารถกำจัดฟอสฟอรัสรวมไปถึงไนโตรเจนที่ปนอยู่ในน้ำเสียได้ นอกจากนี้การมีสาหร่ายในระบบบ่อเติมอากาศยังสามารถกำจัดสารแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid) ได้อีกด้วย ข้อดีของระบบบ่อเติมอากาศคือ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างไม่สูงมาก ระบบบำรุงรักษาง่าย ข้อเสียคือต้องใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมาก เสียค่าไฟฟ้าสำหรับเครื่องเติมอากาศ

2.1.4.2.2 ระบบโปรยกรอง (trickling filter)

น้ำเสียจากกระบวนการบำบัดขั้นต้นจะถูกพ่นเป็นละอองลงบนตัวกลางที่มีจุลินทรีย์เกาะอยู่ วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบนี้มีหลายชนิด เช่น หิน พีวีซี หรือ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น จุลินทรีย์จะสร้างเมือกเคลือบตัวกลางที่มันเกาะอยู่ซึ่งจะช่วยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ตามลำดับ ระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ถึง 80-85% ข้อดีของระบบโปรยกรองคือ ใช้พื้นที่น้อยกว่าระบบบ่อเติมอากาศ ข้อเสียของระบบนี้ มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง และมีปัญหาเรื่องกลิ่น

2.1.4.2.3 ระบบเอเอส (Activated sludge: AS)

เป็นระบบที่นิยมใช้กันทั่วไป ประกอบไปด้วยถังเติมอากาศและถังตกตะกอน เมื่อน้ำเสียจากกระบวนการขั้นต้นเข้าสู่ถังเติมอากาศจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศจะย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งในรูปละลายน้ำและในรูปแขวนลอย ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) และถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสลัดจ์ (sludge) ที่มีจุลินทรีย์ปนอยู่ออกจากส่วนของน้ำใสสลัดจ์บางส่วนจะถูกสูบกลับไปยังถังเติมอากาศเพื่อรักษาความเข้มข้นในถังเติมอากาศ ส่วนน้ำใสก็จะถูกปล่อยออกสู่แหล่งน้ำต่อไป ระบบเอเอสสามารถกำจัดบีโอดีได้ถึง 90-95 % ระบบเอเอสแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบเอเอส (Activated sludge) (Ghaly และคณะ, 2014)

2.1.4.3 การบำบัดขั้นสูง (Tertiary treatment)

เป็นกระบวนการกำจัดไอออนต่างๆ หรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ ที่มีขนาดเล็กที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพที่สูงขึ้นเพื่อนำน้ำที่บำบัดได้ไปหมุนเวียนใช้ในกระบวนการผลิตต่อไประบบที่ใช้ในการบำบัดขั้นสูงที่นิยมใช้กันเช่น ระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis), ระบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) และระบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) แสดงดังรูปที่ 2.4

2.1.4.3.1 ระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

เป็นระบบที่ใช้เมมเบรน (membrane) ที่มีรูพรุนประมาณ 0.0001 ไมครอนในการกรองแยกไอออนต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียรวมถึงสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาล กลูโคส น้ำตาลซูโคส เป็นต้น แต่เนื่องจากแรงต้านทานที่เยื่อกรองมีสูง จึงต้องมีการเพิ่มแรงดันเข้าไปให้มากกว่าแรงดันออสโมติกเพื่อให้ไอออนต่างๆ รวมถึงสารโมเลกุลต่ำถูกแยกออกจากน้ำเสีย (นรา รัตน์พันธ์, 2552)

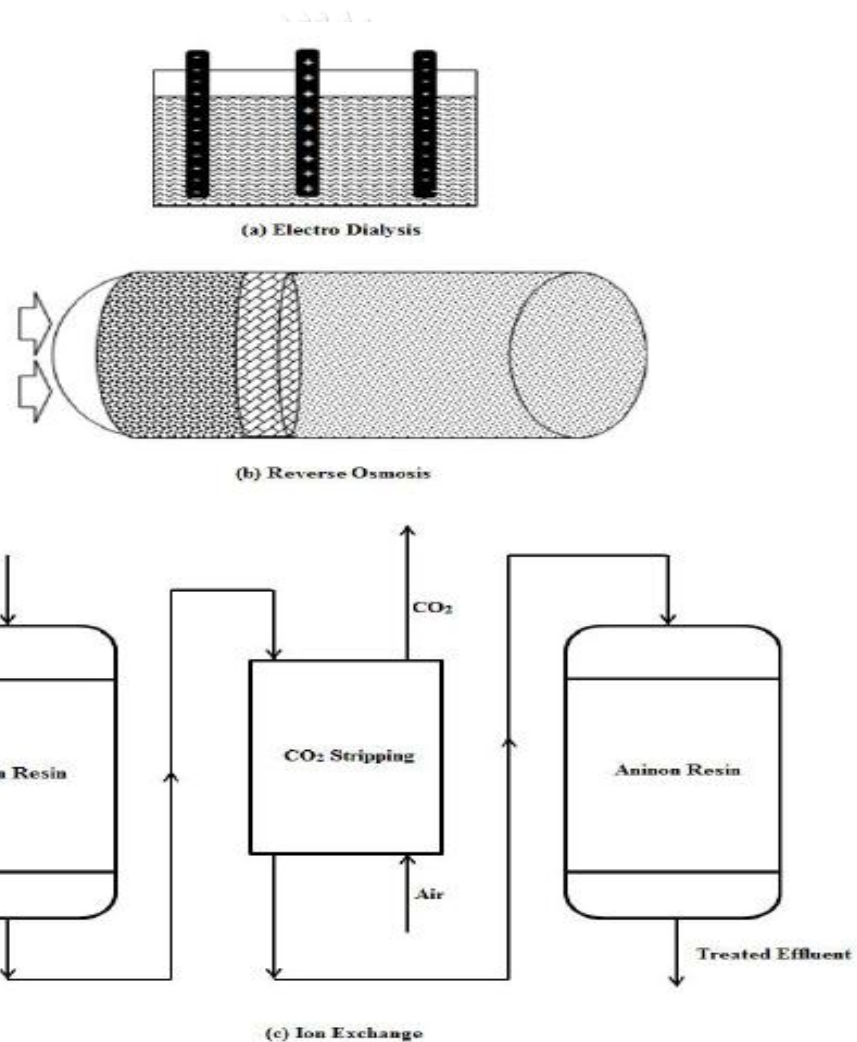
2.1.4.3.2 ระบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นอีกระบบหนึ่งที่ใช้เมมเบรนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งใช้ในการแยกเกลือละลายน้ำหรือสารที่มีประจุออกจากน้ำเสีย ซึ่งระบบนี้มีการปล่อยไฟฟ้าลงในน้ำเสีย เพื่อควบคุมไอออนให้เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนที่มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยเมมเบรนจะต่อขั้วไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ

ซึ่งจะอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าในการดักจับอนุภาคที่มีประจุต่างกับกับขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีประจุเดียวกันจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนออกไปได้

2.1.4.3.3 ระบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินกับไอออนที่อยู่ในน้ำเสียเมื่อน้ำเสียน้ำผ่านเรซินที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนประจุใด ประจุนั้นๆ ในน้ำเสียจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่บนเรซินนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น น้ำเสียเคลื่อนที่ผ่านเรซินที่แลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกจะเกิดการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนในน้ำเสียไปสู่เรซิน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัดขั้นสูง a). ระบบอิเล็กโทรไดอะไลซิส b). ระบบรีเวอร์สออสโมซิส
c). ระบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ghaly และคณะ, 2014)

2.2 สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ หรือ สารพีวีเอ (Poly vinyl alcohol, PVA)

2.2.1 ที่มาและความสำคัญ

เป็นเวลาร้อยกว่าปีมาแล้วที่มีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบเส้นด้ายเพื่อป้องกันรอยขีดข่วนจากกระบวนการทอสิ่งทอ ซึ่งจะต้องผสมแป้งกับสารเคมีชนิดอื่นเพื่อใช้ในการเคลือบเส้นด้าย หลังจากกระบวนการทอ แป้งจะถูกล้างออกจากสิ่งทอและปล่อยน้ำทิ้งออกในรูปของน้ำเสียซึ่งก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการคิดค้นสารเคลือบแป้งชนิดใหม่ คือ สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ หรือ สารพีวีเอ ซึ่งได้มีการนำสารพีวีเอมาใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมาเป็นเวลา 30 ปีแล้วเพื่อลดปัญหาพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีเคลือบเส้นด้าย สารพีวีเอมีลักษณะคล้ายแป้ง แต่ถูกปรับปรุงให้สามารถละลายน้ำได้และปรับปรุงสมบัติการทอเมื่อถูกนำมาใช้ในเส้นใยจำพวกผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ นอกจากนี้การใช้สารพีวีเอแทนแป้งจะช่วยลดค่าบีโอดีในน้ำเสียนั้นไปถึงความเสถียรพอที่จะนำสารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) โครงสร้างโมเลกุลของแป้งและสารพีวีเอแสดงดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้สารพีวีเอยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยา (เช่น ใช้เป็นสารรักษาเสถียรภาพในยาหยอดตา เป็นต้น) หรือใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

กระบวนการนำสารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่เริ่มต้นขึ้นในปี 1973 ในอุตสาหกรรม JP Stevens Manufacturing Plants ในรัฐ South Carolina ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยระบบยังคงดำเนินการอยู่ และยังเป็นบริษัทที่มีคุณค่าในการประหยัดการใช้ทรัพยากรในแง่ของการบำบัดน้ำเสียนั้นไปถึงการใช้สารเคมีและการใช้พลังงานในอุตสาหกรรม ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการนำสารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่โดยการเดินระบบแบบช่วงเดียวพบว่าได้สารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 6,000 ดอลลาร์ต่อวันสำหรับการผลิตสิ่งทอยาว 100 เมตรใน 1 นาที และเมื่อเปลี่ยนมาเดินระบบแบบอัตโนมัติผลิตสิ่งทอยาว 300 เมตรใน 1 นาที พบว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 18,000 ดอลลาร์ต่อวัน หรือ 5,400,000 ดอลลาร์ต่อปี โดยการติดตั้งระบบดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของอุตสาหกรรมซึ่งเมื่อติดตั้งระบบดังกล่าวจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบได้ นอกจากนี้การเดินระบบดังกล่าวยังช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเนื่องจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านระบบการบำบัดน้ำเสียก็สามารถนำน้ำดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ได้ (Porter, 1998) กระบวนการนำสารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่แสดงดังรูปที่ 2.6

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารพีวีเอ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารพีวีเอ

สมบัติ	ลักษณะ
ลักษณะทางกายภาพ	มีลักษณะเป็นผงสีขาว คล้ายแป้ง ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส
สูตรโมเลกุล	$(\text{CH}_2\text{CHOH})_n$
น้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณ (g/mole)	$(44.05)_n$
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	228
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	200
ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.19 - 1.31
จุดวาบไฟ ($^{\circ}\text{C}$)	79
สมบัติการละลาย	ละลายน้ำได้ดี ละลายได้เล็กน้อย ในแอลกอฮอล์
ความเป็นพิษต่อมนุษย์	เกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย ในบริเวณที่สัมผัสกับสาร

2.2.3 ปัญหาน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารพีวีเอ

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารพีวีเอจากกระบวนการลอกแป้งจะมีค่าซีโอดีสูง ประมาณ 10,000 -15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมไปถึงค่าบีโอดี ค่าของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งละลายน้ำ (Ghaly และคณะ, 2014) นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการดังกล่าวยังมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีการใช้น้ำร้อนในการละลายสารพีวีเอออกจากเส้นใยในสิ่งทอ โดยสารพีวีเอเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากด้วยวิธีชีวภาพ ดังนั้นถ้าไม่มีการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวอย่างถูกวิธีแล้วปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเน่าเสีย รวมไปถึงทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตายเนื่องจากอุณหภูมิ น้ำเสีย และ ปริมาณสารพีวีเอที่มีค่าสูงเกินไป

2.2.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสารพีวีเอเป็นองค์ประกอบ

1. กระบวนการเฟ้นต้น จากงานวิจัยของ Sheng H. Lin และ Lo (1997) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากกระบวนการลอกแป้ง ซึ่งมีสารพีวีเอและสี้อมประเภท Blue G และ Black B เป็นองค์ประกอบด้วยกระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเฟ้นต้นคือ ที่พีเอชเท่ากับ 3 และช่วงอุณหภูมิน้ำเสียประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยสภาวะที่เหมาะสมนี้จะสามารถบำบัดค่าซีโอดีให้ลดลงเท่ากับค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้การใช้ระบบร่วมโคแอกกูเลชันต่อจากระบบเฟ้นต้น (โดยการเติมสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับสารโพลีเมอร์ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร) ยังช่วยกำจัดฟล็อกที่อยู่ในน้ำเสียรวมไปถึงลดปริมาณสีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้

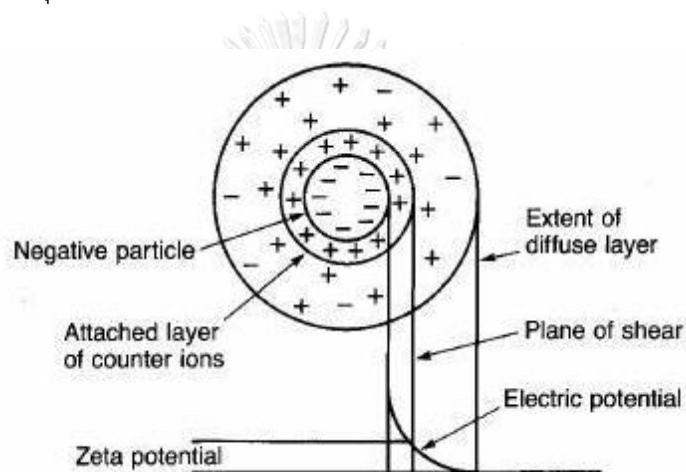
2. กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ จากงานวิจัยของ Sakazawa และคณะ (1981) ได้ศึกษาการปรับตัวการอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์ในสารพีวีเอ โดยคัดเลือกแบคทีเรียหลายชนิดที่ใช้สารพีวีเอจากสิ่งแวดล้อมหลายๆแห่ง โดยแบคทีเรียในกลุ่มจีโนสของ *Pseudomonas* จะถูกคัดเลือกออกมาจากกลุ่มอื่นๆจากนั้นก็คัดเลือกมา 2 สายพันธุ์ คือ *Pseudomonas putida* VM15A และ *Pseudomonas* sp. VM15C ซึ่งเป็นคู่ที่สามารถอาศัยอยู่ร่วมกันได้ (symbiotic) การศึกษาทางกายภาพพบว่า การอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์ดังกล่าวจะมีหนึ่งสายพันธุ์ที่สร้างเอนไซม์มาย่อยสารพีวีเอ ซึ่งก็คือชนิด VM15C ส่วนอีกสายพันธุ์จะสร้างสารโคแฟกเตอร์ที่จำเป็นให้กับจุลินทรีย์ที่สร้างเอนไซม์ ซึ่งก็คือชนิด VM15A โดยชนิดที่สร้างเอนไซม์มาย่อยสารพีวีเอ เป็นสายพันธุ์ที่มีความโดดเด่นกว่าจุลินทรีย์อื่นๆที่อยู่ใน mixed culture

2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์ในน้ำเสียด้วยการเติมสารเคมี เพื่อให้อนุภาคดังกล่าวเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนแยกออกมาจากน้ำเสีย การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานโดยไม่ตกตะกอน กล่าวได้ว่าคอลลอยด์นั้นมีเสถียรภาพสูง นอกจากนี้คอลลอยด์ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าทำให้อนุภาคคอลลอยด์เป็นได้ทั้งประจุ

บวกและประจุลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Electric Double Layer แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งกล่าวว่าอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า 2 ชั้นคือ (แน่นน้อย วิจิตรจรรยากุล, 2543)

1. ชั้นตรึง (Fixed layer) ประกอบด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามซึ่งเกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคกับประจุไฟฟ้าของสารแขวนลอย
2. ชั้นกระจาย (Diffuse layer) เป็นชั้นที่ประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามถูกดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์และกระจายตัวอยู่ในน้ำ ซึ่งความหนาแน่นจะลดลงตามระยะห่างจากผิว ขนาดของชั้นกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้า ปริมาณและชนิดของไอออน



รูปที่ 2.7 แบบจำลอง Electric double layer

ที่มา : http://educa.univpm.it/inglese/retentio_file/image002.jpg

นอกจากนี้ทฤษฎีดังกล่าวใช้พิจารณาอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้อนุภาคดังกล่าวสร้างแรงดึงดูดกับไอออนประจุบวกที่อยู่ในน้ำให้วิ่งเข้ามาสะสมประจุบวกที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ความหนาแน่นของไอออนบวกมากที่สุดจะอยู่ที่ผิวคอลลอยด์และลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว และน้อยลงเมื่อห่างออกไป โดยตามทฤษฎีของ double layer เชื่อว่าไอออนบวกชั้นในสุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เพราะ ไอออนบวกมักมีโมเลกุลน้ำห่อหุ้มอยู่เปรียบเสมือนชั้นเปลือกบางขวางเอาไว้เรียกว่า stern layer โดยอยู่ชั้นในสุด ส่วนเปลือกชั้นนอกเรียกว่าชั้นกระจาย (diffuse layer) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

หรือตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอติ (เพิ่มศักย์ ภายจนบุตร, 2550) กระบวนการทำให้อนุภาครวมตัวกันและตกตะกอนแยกออกมา มี 2 ขั้นตอน

1. การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์มีกระบวนการ 4 แบบ

1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer)

การเพิ่มประจุตรงข้าม (counter ion) ในชั้นกระจาย โดยประจุตรงข้ามจะไปสะสมบริเวณผิวของอนุภาคคอลลอยด์มากขึ้น ทำให้ประจุอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลห่างจากอนุภาค ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคสามารถเข้าใกล้กันได้

1.2 การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization)

การเติมสารเคมีบางชนิดที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ จะทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดติดสารเคมีไว้ที่ผิวได้ ซึ่งการดูดติดผิวนี้จะลดค่าศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะแตกต่างจากกระบวนการลดความหนาของชั้นกระจายคือ

1.2.1 ต้องการประจุไฟฟ้าตรงข้ามน้อยกว่ากระบวนการลดความหนาของชั้นกระจาย เนื่องจากไอออนต่างประจุเข้าถึงผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้ ทำให้การทำลายศักย์ไฟฟ้าได้ผลดีกว่า

1.2.2 การทำลายเสถียรภาพเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) ปริมาณสารเคมีที่ใช้สร้างตะกอนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณอนุภาคคอลลอยด์

1.2.3 การเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์เพื่อเปลี่ยนประจุอนุภาคคอลลอยด์ ในปริมาณที่มากเกินไปไม่สามารถเปลี่ยนประจุที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้ เนื่องจากประจุต่างชนิดจากสารเคมีที่เติมลงไปจะถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ ส่วนประจุที่เติมเกินพอจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้นไม่ว่าจะเติมสารเคมีมากเท่าใดก็ไม่สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ได้

1.3 ท่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep coagulation)

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะหนักบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่เพียงพอ จะเกิดการตกผลึกลงมาอย่างรวดเร็ว โดยอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนของผลึกหรือจับตัวรวมกับผลึกได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์เสถียรภาพและตกตะกอนได้ โดยกลไกของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารสร้างตะกอน กล่าวคือ ปริมาณสารสร้างตะกอนแปรผกผันกับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ ถ้าในน้ำมีอนุภาคคอลลอยด์มากต้องใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณน้อย เพราะในน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์มากจะมีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคได้ดี เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกทำลายเสถียรภาพจะเกิดการจับตัวรวมกันและตกตะกอนได้ง่ายกว่าน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อย ทำให้ใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนน้อยกว่า

1.4 การใช้สารโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารโพลิเมอร์ มีทั้งที่เป็นสารธรรมชาติ เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีนบางชนิด หรือสารโพลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งสารโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง เป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของสารโพลิเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่มีสารโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระเกาะอนุภาคอื่นถือว่าเป็นอนุภาคที่เสถียรภาพแล้ว และปลายอิสระดังกล่าวจะเกาะกับอนุภาคคอลลอยด์อื่นทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้

2. การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่เสถียรภาพ มารวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (flocculation)

โดยวิธีการสร้างสัมผัสให้อนุภาคมีหลายวิธีดังนี้ (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2553)

2.1 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีที่นิยมที่สุดคือ การกวน โดยกวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลต่างกัน ส่งผลให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงเกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค ความเร็วในการกวนไม่ควรมากเกินไป เพราะว่าจะส่งผลให้ฟล็อกแตกได้ วิธีการสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic Flocculation

2.2 การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นเองได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบ บราวเนียน ซึ่งเกิดจากอนุภาคคอลลอยด์มีการชนกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ การสร้างสัมผัสแบบนี้เรียกว่า Perikinetic Flocculation

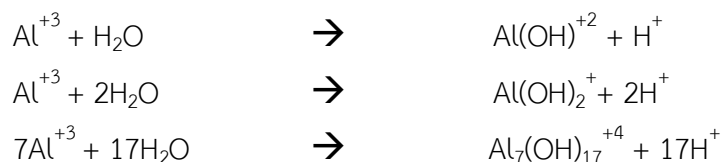
2.3 การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น เนื่องจากอนุภาคต่างๆ มีอัตราการตกตะกอนไม่เท่ากัน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย โดยอนุภาคที่สามารถสามารถสร้างฟล็อกคูลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

2.4 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 –1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. การสร้างสัมผัสแบบ Orthokinetic Flocculation อาจทำได้ แต่เกิดขึ้นช้า ดังนั้นวิธีแก้ไขคือ การใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วหรือถังกรองแบบ 2 ชั้น เป็นต้น

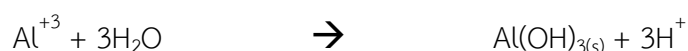
2.5 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีการกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

สารสร้างตะกอน (Coagulants)

1. สารส้ม (Alum) สารส้มเป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันในระบบการผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีราคาถูก สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารส้มคือ $(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ อย่างไรก็ตามการใช้สารส้มขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าพีเอชของน้ำที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิหรือค่าพีเอชของน้ำต่ำเกินไปจะทำให้เกิดสารอลูมิเนียมส่วนเกินในน้ำมาก ส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยสถานะที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ สถานะที่เป็นกรดเล็กน้อย (Sahu และ Chaudhari, 2013) การเติมสารส้มลงในน้ำ อลูมิเนียมไอออนจาก $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลน้ำเกิดเป็น $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ หรือ Al^{3+} การไฮโดรไลซิสของ Al^{3+} จะเกิดขึ้นทันทีโดยลิแกนด์ชนิดต่างๆในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลน้ำเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออนดังสมการต่อไปนี้



ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก Al_3



ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือสารเชิงซ้อน ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก Al^{3+} ถึง $Al(OH)_3$ สารเชิงซ้อนอาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าค่าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ $Al(OH)_{3(s)}$ จะเกิดสารเชิงซ้อนประจุลบ เช่น $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_5^{-2}$ ถ้าค่าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจะสะเทินทางไฟฟ้าของ $Al(OH)_{3(s)}$ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารเชิงซ้อนประจุบวกเช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^+$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2553)

2. โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride หรือ PACl) ประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันนอกจากสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงสถานะที่เหมาะสมอีกด้วยเช่น ผลกระทบจากค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างกับการใช้สารสร้างตะกอนอลูมิเนียมซัลเฟต ซึ่งอลูมิเนียมซัลเฟตเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลงมากดังสมการต่อไปนี้



ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ สารประกอบไฮดรอกไซด์และกรดแร่ ซึ่งมีผลต่อค่าพีเอชในน้ำจึงต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำไม่ให้มีค่าพีเอชต่ำลงมาก ดังสมการต่อไปนี้



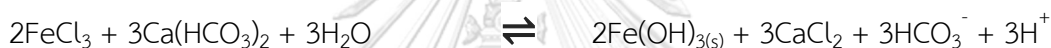
จากสมการข้างต้นการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้เกิดการลอยของตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำซึ่งเป็นปัญหาในขั้นตอนการกำจัดตะกอน และอาจทำให้เกิดความกระด้างถาวรขึ้นมาด้วย ดังนั้นโพลีลูมิเนียมคลอไรด์จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยคลอไรด์ไอออนจะไปรวมตัวกับตะกอนทำให้ตะกอนตกลงสู่เบื้องล่างง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงน้อย และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้อลูมิเนียมซัลเฟต (ธีรวิทย์ จันทร์ชนะ, 2542)

คุณสมบัติของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์เมื่อเป็นสารสร้างตะกอน

- มีประสิทธิภาพในการสร้างตะกอน รวมตะกอน และตกตะกอนสูง
- ละลายน้ำได้ดี

- ช่วงค่าพีเอชในการเกิดปฏิกิริยาคว้างกว่าสารสร้างตะกอนตัวอื่น ประมาณ 5 – 10
- ใช้ระยะเวลาในการกวนเร็ว (Rapid mixing) น้อยกว่า

3. เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) มีลักษณะเป็นผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเหลี่ยมหรือดำ แต่ถ้าละลายน้ำจะมีสีน้ำตาลแกมเหลือง มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำนั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตในน้ำและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับไบคาร์บอเนต ดังสมการต่อไปนี้ (พรศักดิ์ สมรโกรสรกิจ, 2553)



4. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว แมกนีเซียมคลอไรด์ได้ถูกนำมาใช้เป็นสารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียประเภทสีย้อม โดยช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 9 – 12 ซึ่งการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ร่วมกับปูนขาวจะบำบัดสีย้อมได้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่มีข้อเสียคือ ปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นมีมากทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดเพิ่มขึ้น (Verma, Dash และ Bhunia, 2012)

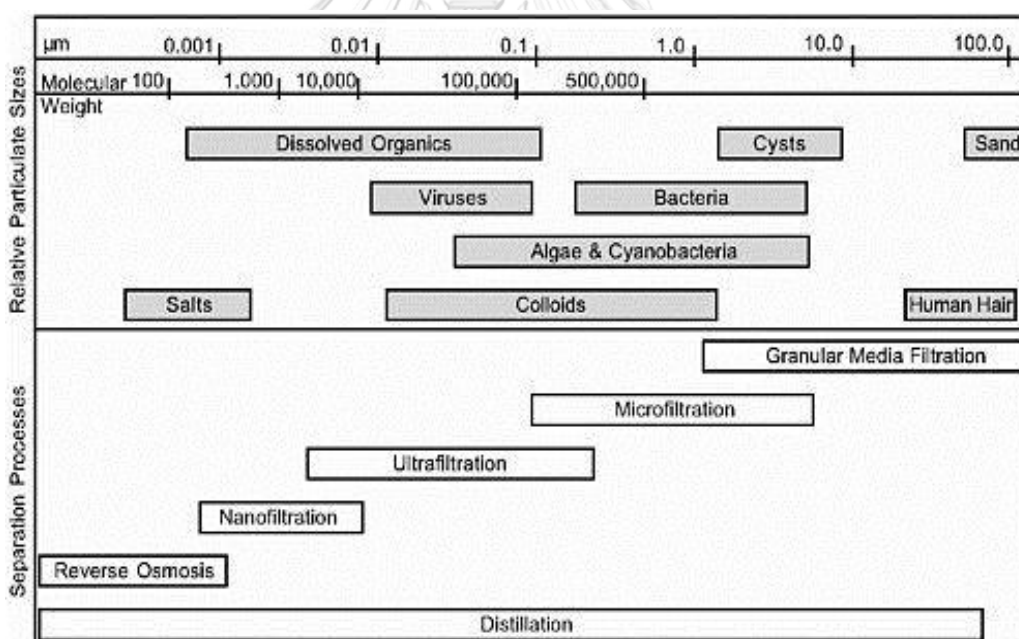
2.4 กระบวนการเมมเบรน (Membrane process)

2.4.1 ทฤษฎีของเมมเบรน

เมมเบรน คือ แผ่นฟิล์มบางๆ ของสารอินทรีย์สังเคราะห์หรือสารอนินทรีย์ที่ทำให้เกิดการแยกตัวอย่างละเอียดของอนุภาคในของไหล ซึ่งก็คือก๊าซหรือของเหลว เมมเบรนมีหลายรูปร่างทั้งแบบแผ่น (plates and frame) แบบหลอด (tubular) หรือแบบเส้นใย (hollow – fiber) เป็นต้น โดยทั่วไปเมมเบรนประเภทสารอนินทรีย์จะมีความต้านทานต่อสารเคมี และความดันสูงกว่าประเภท

สารอินทรีย์ แต่มีความยุ่งยากและมีราคาแพงกว่า (นรา รัตนพันธ์, 2552) ข้อดี-ข้อเสียของเมมเบรนอินทรีย์เทียบกับเมมเบรนอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.3

กระบวนการแยกสารปนเปื้อนออกจากของไหล (ในที่นี้จะกล่าวถึงของเหลว) ด้วยเมมเบรนมีจุดเด่นสำคัญในแง่ของการใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้น จึงไม่ต้องการความร้อนเพื่อการเปลี่ยนเฟส นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียสมบัติหรือสภาพได้เมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนส่วนใหญ่ดำเนินการที่สภาวะปกติ (อุณหภูมิห้องที่ความดัน 1 บรรยากาศ) การแยกด้วยเมมเบรนสามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้น (Concentration) แยกลำดับส่วน (Fractionate) และทำให้บริสุทธิ์ (Purify) ได้พร้อมกัน กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ เป็นกระบวนการแยกอนุภาคในเฟสของเหลวด้วยความดัน แต่มีความสามารถแยกขนาดอนุภาคได้ต่างกัน (ชินทอง สุนทรภา, 2547) แสดงดังรูปที่ 2.8



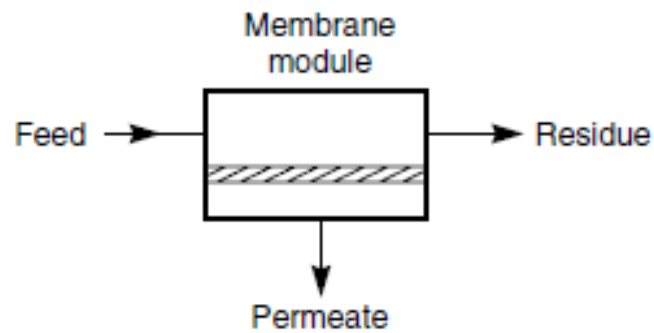
รูปที่ 2.8 เกณฑ์การเลือกกระบวนการแยก

ที่มา : <http://what-when-how.com/nanoscience-and-nanotechnology/nanofiltration-separations-part-1-nanotechnology/>

ตารางที่ 2.3 ข้อดี-ข้อเสียของเมมเบรนอนินทรีย์เทียบกับเมมเบรนอินทรีย์ (จันทร์ทอง สุนทรภา, 2547)

ข้อดี	ข้อเสีย
มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง	ราคาแพง
มีความต้านทานต่อสภาวะที่รุนแรง	เปราะ
มีความต้านทานต่อความดันสูงๆ	พื้นที่เมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโมดูลต่ำ
ไม่สามารถถูกย่อยโดยจุลินทรีย์	ยากที่จะได้ค่าการคัดเลือกสูงๆ ในเมมเบรนที่มีรูพรุนแบบ Microporous
ทำความสะอาดง่ายเมื่อเกิดการอุดตัน	มีค่าการซึมผ่าน (Permeability) ต่ำ
กระตุ้นด้วยสารเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย	การผนึกเมมเบรนให้แน่นติดกับโมดูลไม่ให้เกิดการรั่วที่อุณหภูมิสูงๆ ทำได้ยาก

เมมเบรนเป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหล 2 เฟสที่มีสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่านได้โดยการถ่ายโอนมวลทั้งหมดเกิดขึ้นที่ด้านความหนาของเมมเบรน ซึ่งมีขนาดมิติ (Dimension) น้อยกว่าด้านกว้าง-ยาว มากๆ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนมีหลักการแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยมีสารป้อน (Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเมมเบรน ส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) และส่วนของสารป้อนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) แรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น วัสดุที่นำมาทำเมมเบรนมีหลายชนิดอาจเป็นพอลิเมอร์ เซรามิกส์ ซีโอไลต์ โลหะ (เช่น แพลลาเดียม หรือ เงิน เป็นต้น) คาร์บอน หรือ ของเหลว เป็นต้น

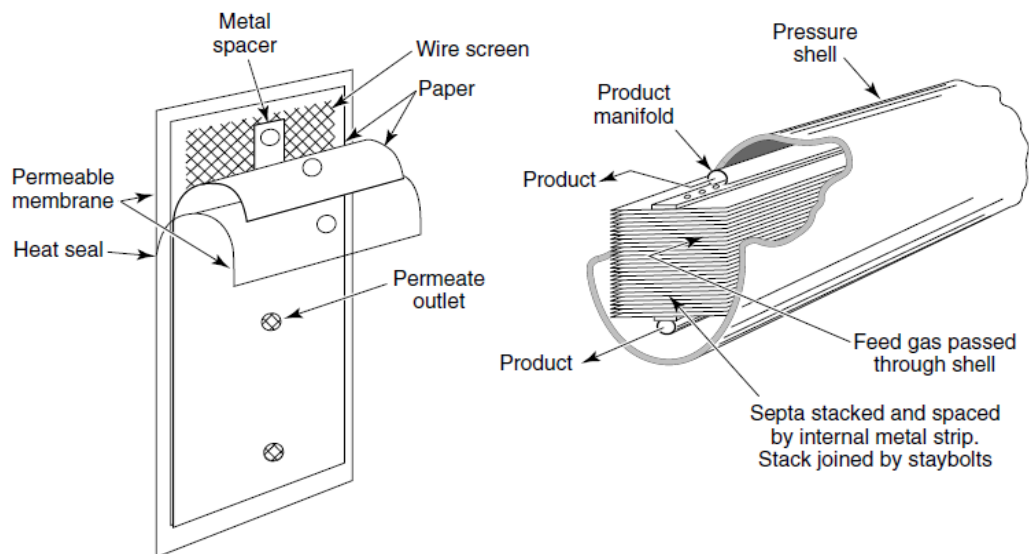


รูปที่ 2.9 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน (Baker, 2004)

โมดูลเมมเบรน (Membrane module)

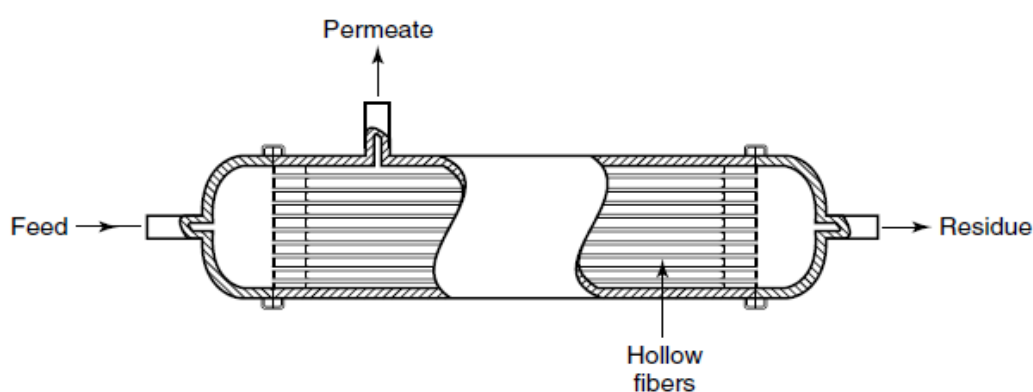
ในการนำเมมเบรนไปใช้งานจำเป็นต้องติดตั้งในอุปกรณ์ที่เรียกว่า "โมดูล" ซึ่งมีทั้งหมด 4 แบบ

1. แบบแผ่น (Plate and frame) ใช้ในห้องปฏิบัติการสำหรับงานวิจัยด้านนาโนฟิลเตรชันและแบบออสโมซิสผันกลับ ในการทดลองจะวางเมมเบรนบนฐานรองรับที่มีรูพรุน (Porous support plate) แล้วหนีบยึดเข้าไว้ด้วยสกรู มีเกจ (Gauge) สำหรับวัดความดันทั้งขาเข้าและขาออกจากเมมเบรน รูปที่ 2.10 แสดงโมดูลแบบแผ่น



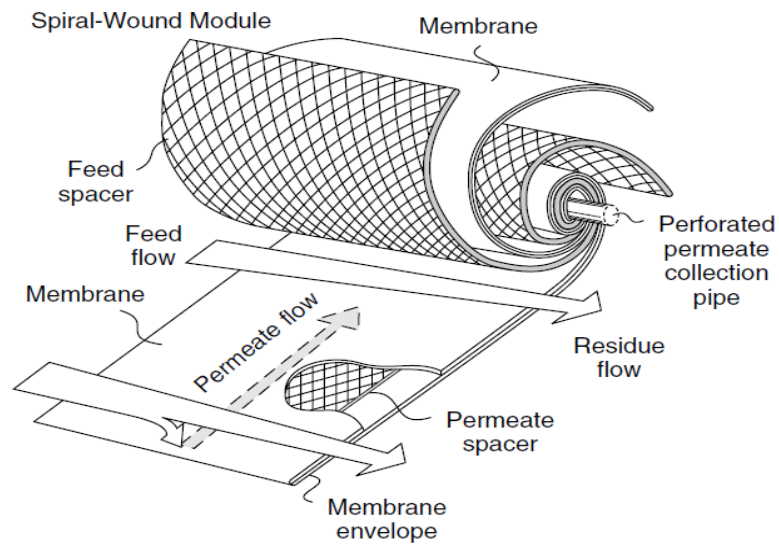
รูปที่ 2.10 ลักษณะโมดูลแบบแผ่น (Baker, 2004)

2. แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) ใช้เส้นใยโพลิเมอร์จำนวนหลายพันเส้นที่ได้จากกระบวนการปั่น (Spinning process) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 – 100 ไมครอน โดยเส้นใยดังกล่าวเป็นเส้นใยที่มีชั้นคัดเลือก (Selective layer) อยู่ทางด้านนอกและที่ปลายอิสระของเส้นใยถูกยึดด้วยอีพอกซี เพื่อให้ส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนเส้นใยไหลผ่านช่องว่างในเส้นใยไปยังปลายเปิดที่ยึดติดกันด้วยอีพอกซีเพื่อไหลออกสู่โมดูล ส่วนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนเส้นใยจะไหลไปตามผนังด้านนอกเส้นใยเพื่อไปยังปลายด้านตรงข้าม รูปที่ 2.11 แสดงโมดูลแบบเส้นใยกลวง



รูปที่ 2.11 ลักษณะโมดูลแบบเส้นใยกลวง (Baker, 2004)

3. แบบท่อม้วน (Spiral wound) ลักษณะเป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนรอบท่อเจาะรู และป้อนสาร (Feed) ในทิศทางตามแนวแกนของเมมเบรน ส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้จะไหลรวมกันออกจากโมดูลทางท่อเจาะรู สำหรับ Feed channel spacer และ Permeate channel มีบทบาทเพื่อทำให้เกิดการกระจายสารที่ป้อนเข้าระบบอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าเมมเบรนและเพื่อนำเพอร์มิเอตให้ไหลไปยังท่อเจาะรูที่อยู่ตรงกลาง รูปที่ 2.12 แสดงโมดูลแบบท่อม้วน



รูปที่ 2.12 ลักษณะโมดูลแบบท่อม้วน (Baker, 2004)

4. แบบท่อ (Tubular) เมมเบรนที่เป็นโมดูลแบบท่อโดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 - 2.5 เซนติเมตร และโดยปกติโมดูลแบบท่อหนึ่งๆจะประกอบด้วยเมมเบรนแบบท่อจำนวน 10 - 30 แห่งรวมกันในท่อขนาดใหญ่ เพอร์มิเอตจากเมมเบรนแบบท่อแต่ละแห่งไหลรวมกันอยู่ในท่อขนาดใหญ่ด้านนอกก่อนออกจากโมดูล รูปที่ 2.13 แสดงโมดูลแบบท่อ



รูปที่ 2.13 ลักษณะโมดูลแบบท่อ (Baker, 2004)

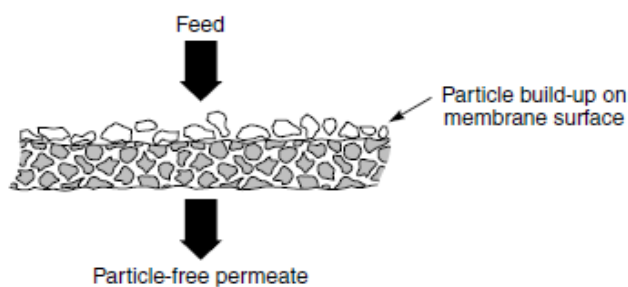
ลักษณะการไหลผ่านโมดูลเมมเบรน

รูปแบบการไหลของของไหลผ่านโมดูลของเมมเบรนที่สำคัญแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

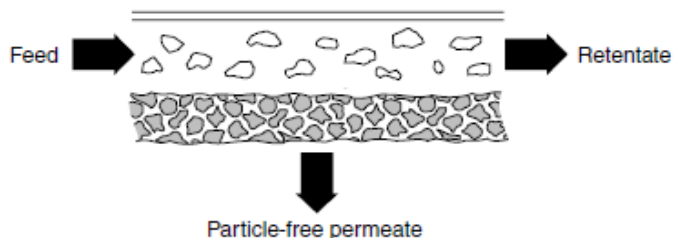
1. การไหลแบบ Dead-end filtration หรือ In-line filtration เป็นรูปแบบการกรองพื้นฐานที่ใช้กัน การไหลแบบ Dead-end flow ประยุกต์ใช้ในการเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) ทิศทางการไหลของสารป้อน (Feed) จะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวของเมมเบรน แสดงดังรูปที่ 2.14(a) ส่งผลให้เกิดการสะสมของมลสารที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตัน (Clogging) ผลจากการเกิดการอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการกำจัดมลสารที่สะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนเพื่อรักษาประสิทธิภาพการกรองรวมไปถึงลดความเสียหายของเมมเบรน

2. การไหลแบบ Crossflow filtration ทิศทางการกรองซึ่งเกิดจากความดันที่เข้าสู่ระบบเคลื่อนที่ในแนวทิศทางการตั้งฉากกับการไหลของสารป้อน (Feed) ซึ่งเคลื่อนที่ขนานกับผิวของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.14(b) การไหลในรูปแบบดังกล่าวทำให้การสะสมของมลสารที่ผิวเมมเบรนมีน้อยกว่าแบบ Dead-end ทำให้รูปแบบการไหลนี้เหมาะกับของไหลที่มีความเข้มข้นของมลสารมากๆ

(a) In-line filtration



(b) Cross-flow filtration



รูปที่ 2.14 ลักษณะการไหลผ่านโมดูลเมมเบรน แบบ Cross flow filtration (a) และแบบ In-line filtration (b) (Baker, 2004)

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม

1. เมมเบรนอินทรีย์ (Organic membranes) เมมเบรนอินทรีย์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม ประกอบด้วย Synthetic membrane และ natural polymer membrane ตัวอย่างของ Synthetic membrane ได้แก่ Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polyvinylidenedifluoride (PVDF) เป็นต้น สำหรับตัวอย่างของ natural polymer ได้แก่ ยาง, ไม้, เซลลูโลส เป็นต้น

2. เมมเบรนอนินทรีย์ (Inorganic membranes) วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนอนินทรีย์มีหลายประเภท ได้แก่ โลหะ, เซรามิก และ ซีโอไลต์ เป็นต้น

2.1 เมมเบรนชนิดโลหะ ส่วนใหญ่คือ พลาเตียม มีการใช้พลาเตียมเป็นวัสดุเมมเบรนเพื่อใช้แยกไฮโดรเจนจากกระบวนการกลั่นเมื่อนานมาแล้ว เนื่องจากสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 370 °C แต่มีข้อเสียคือ พลาเตียมมีราคาแพงมาก และมีความเป็นพิษสูง

2.2 เมมเบรนชนิดเซรามิก วัสดุที่นำมาใช้ เช่น อลูมิเนียมออกไซด์, ไทเทเนียมออกไซด์ หรือ ซิลิกาออกไซด์ เป็นต้น ข้อดีของเซรามิกคือ มีความเฉื่อยและสมดุล ทนความร้อนและทนการกัดกร่อนได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหาร หรือ ยา เป็นต้น

2.3 เมมเบรนชนิดซีโอไลต์ นิยมใช้ในกระบวนการแยกแก๊สที่มีความจำเพาะสูง วัสดุซีโอไลต์มีความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีจึงเหมาะกับการใช้งานในถังปฏิกรณ์ ข้อเสียของซีโอไลต์คือมีค่าการซึมผ่านของแก๊สที่ต่ำและตัวเมมเบรนต้องมีความหนาเพื่อป้องกันการแตกของเมมเบรน

2.4.2 กระบวนการของเมมเบรน

2.4.2.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเพื่อแยกอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในช่วง 500 – 20,000 อังสตรอม ออกจากของเหลวหรือแก๊ส จากข้อมูลในตารางที่ 2.4 อัตราเร็วในการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ต้องใช้เวลานานหลายชั่วโมงจนถึงหลายวันในการตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในช่วงดังกล่าวข้างต้นออกมาได้ ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนลงมา

ตารางที่ 2.4 ระยะเวลาในการตกตะกอนของอนุภาคแต่ละขนาด (ชั้นทอง สุนทรภา, 2547)

ขนาดรัศมีของอนุภาค	ชนิดของอนุภาค	ระยะเวลาในการตกตะกอน
10 มิลลิเมตร	กรวด (Gravel)	0.3 วินาที
1 มิลลิเมตร	ทรายหยาบ (Coarse sand)	3 วินาที
100 ไมครอน	ทรายละเอียด (Fine sand)	38 วินาที
10 ไมครอน	ทรายแป้ง (Silt)	33 นาที
1 ไมครอน	แบคทีเรีย (Bacteria)	55 ชั่วโมง
100 นาโนเมตร	คอลลอยด์ (Colloid)	230 ชั่วโมง
10 นาโนเมตร	คอลลอยด์ (Colloid)	6.3 ปี
1 นาโนเมตร	คอลลอยด์ (Colloid)	63 ปี

เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะโครงสร้างของรู คือ Screen filter และ Depth filter โดย Screen filter มีโครงสร้างเป็นรูทรงกระบอกตรง (Capillary-type pores) แต่ Depth filter มีโครงสร้างของรูบิดไปมา (Tortuous-type pores) โดยวัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบบ Screen filter มักเป็นโพลีคาร์บอนเนตหรือโพลีเอสเตอร์ ขณะที่วัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบบ Depth filter มักเป็นโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC), โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF), โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE), สารประกอบเซลลูโลส, ไนลอน, โพลีเอเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone), โพลีโพรพิลีน (PP) เป็นต้น Screen filter สามารถเตรียมขึ้นได้ด้วยเทคนิค Track-etching ส่วน Depth filter ที่ทำจากโพลีเมอร์อินทรีย์สามารถเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคเฟสอินเวอร์ชัน ส่วนที่ทำจาก PTFE และ PP เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการยืดฟิล์ม (Stretching) ถึงแม้ว่าขนาดรูเมมเบรนนิยมใช้เกณฑ์ในการแยกประเภท อย่างไรก็ตามอาจแบ่งประเภทเมมเบรนจากค่า Molecular weight cutoff ได้ ดังตารางที่ 2.5 เมมเบรนต่างชนิดกันที่มี Molecular weight cutoff เท่ากัน อาจมีการกระจายขนาดรูแตกต่างกัน ค่า Molecular weight cutoff มีประโยชน์ใช้เป็นตัวพิจารณาเลือกเมมเบรนให้เหมาะกับการใช้งานได้

ตารางที่ 2.5 ระดับน้ำหนักรวมของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรนประเภทต่างๆ (ชั้นทองสุนทรภา, 2547)

ประเภทของเมมเบรน	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	น้ำหนักรวม (ตัน)
ไมโครฟิลเตรชัน	≥ 0.1	$\geq 500,000$
อัลตราฟิลเตรชัน	0.01 – 0.1	1,000 – 500,000
นาโนฟิลเตรชัน	0.001 – 0.01	100 – 1,000
ออสโมซิสผันกลับ	≤ 0.001	≤ 100

2.4.2.1.1 กลไกการกักอนุภาคของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

อนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดรูของ Screen filter จะถูกกักไว้โดยตรงบนผิวหน้าของเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูของเมมเบรนสามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ถ้าไม่มีการอัดติดเนื่องจากความเฉื่อย (Internal impaction) และการซึมซาบ (Diffusion) ของอนุภาคบนผนังรู สำหรับกลไกการกักอนุภาคของ Depth filter คือ การดูดซับ (Adsorption) และการดักติด (Entrapment) อนุภาคส่วนใหญ่ถูกจับไว้ภายในซอกของเมมเบรน ยกเว้นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากความสามารถในการกักอนุภาคของ Depth filter ขึ้นอยู่กับเส้นทางการไหลของของไหล นอกจากนี้ Depth filter ยังมีพื้นที่ผิวใช้ประโยชน์ได้ (Available surface area) มากกว่า Screen filter อย่างมาก ดังนั้น Depth filter จึงสามารถกักอนุภาคไว้เป็นปริมาณมากกว่า Screen filter และมีตำแหน่งให้โปรตีนและไวรัสยึดเกาะได้

2.4.2.1.2 สมบัติของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

การระบุลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีรูพรุนของทั้งไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ ค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน (Trans-membrane flux) ขนาดรูพรุน (Pore size) การกระจายขนาดรู (Pore size distribution) ค่า Molecular weight cutoff สมบัติความชอบ/ไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน (Chemical and thermal stability) และการทำความสะอาดได้ (Cleanability) ซึ่งในการหาค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนจะใช้สมการที่ 2.1 โดยจะทดสอบที่ความดันต่างๆกับน้ำสะอาดเพื่อไม่ให้เกิด

การอุดตันของรูพรุน ค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมักลดลงตามระยะเวลาในการดำเนินการทดสอบ เนื่องจากเกิดการอัดตัว (Compaction) ของโครงสร้างเมมเบรนภายใต้แรงดัน ซึ่งค่าการอัดตัว (Compaction factor) สามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างฟลักซ์ที่ความดันคงที่ หนึ่งๆกับเวลาบนสเกลกึ่งลอการิทึม (Semi-logarithm) หน่วยของค่าฟลักซ์มีได้หลายแบบ เช่น ในเชิงปริมาตร หน่วยเป็นปริมาตรต่อพื้นที่ต่อเวลา ในเชิงโมล หน่วยเป็นโมลต่อพื้นที่ต่อเวลา เป็นต้น สำหรับพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ คือพื้นที่ของผิวเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของของไหล

$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (2.1)$$

เมื่อ J = Permeate flux ($\text{m}^3/\text{s m}^2$)

Q = Permeate flow (m^3/s)

A = Membrane area (m^2)

Δt = Time (s)

Molecular weight cutoff คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลสารทดสอบที่ถูกเมมเบรนกักไม่ให้ผ่านได้ 90 – 95% โดยค่าการไม่ยอมรับ (Rejection) หาได้ตามสมการที่ 2.2 แต่ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันใช้คำว่า “ค่าการคงอยู่ (Retention)” ซึ่งมีนิยามตามสมการที่ 2.3 เพื่อเน้นถึงองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกออกจากสารละลาย โดยสารที่แยกออกในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน คือ โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ได้ผ่านเมมเบรนออกไป ซึ่งสารดังกล่าวจะถูกนำไปหมุนเวียนใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น โพรตีน หรือจุลินทรีย์บางชนิด ขณะที่องค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันหรือออสโมซิสผันกลับ คือ น้ำบริสุทธิ์ จึงต้องพิจารณาค่าการไม่ยอมรับตัวละลายผ่านเมมเบรน

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.2)$$

$$R_f = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.3)$$

เมื่อ	R	=	Solute rejection
	R_f	=	Retention
	C_p	=	Permeate solute concentration (kg/m^3 , $\text{kg mol}/\text{m}^3$)
	C_f	=	Feed solute concentration (kg/m^3 , $\text{kg mol}/\text{m}^3$)
	C_r	=	Retentate solute concentration (kg/m^3 , $\text{kg mol}/\text{m}^3$)

ตัวละลาย (Solute) ที่ใช้ในการทดสอบหา Molecular weight cutoff มีรูปเป็นทรงกลม ได้แก่ โปรตีนต่างๆ เช่น อัลบูมิน (Albumin) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นต้น โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ต่างๆ เช่น เด็กซ์ทริน (Dextrin) เป็นต้น

2.4.2.1.3 การประยุกต์ใช้งานไมโครฟิลเตรชัน

เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทโดยมีลักษณะการใช้งานในแต่ละอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.6 เนื่องจากมีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนจึงมักใช้แยกโปรตีนขนาดใหญ่ แยกจุลินทรีย์ทั้งไวรัส แบคทีเรีย และประเภทอื่นๆ ในการผลิตโปรตีนสังเคราะห์ ใช้กรองเบียร์หรือไวน์ แยกของแข็งแขวนลอยที่เป็นสาเหตุของความขุ่นในน้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้งานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (ชั้นทอง สุนทรามา, 2547)

อุตสาหกรรม	การใช้งาน
กระบวนการหมัก	ใช้ฆ่าเชื้อและกำจัดอนุภาคขนาดเล็กในแก๊สหรือของเหลว
ยา	ใช้แยกสารผสม hemocyte/serum
อิเล็กทรอนิกส์	กำจัดอนุภาคขนาดเล็กในน้ำเสีย, การทำน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีให้เป็นน้ำบริสุทธิ์ (Purification)
อาหารและเครื่องดื่ม	การทำน้ำมันเหลือใช้, เบียร์สดให้บริสุทธิ์ (Purification)
อื่นๆ	กำจัดอนุภาคขนาดเล็กในน้ำมัน, ทำน้ำบริสุทธิ์เพื่อการอุปโภค

2.4.2.2 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนบนเมมเบรนอยู่ในช่วง 30 – 1,000 อังสตรอม ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้เพื่อแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 1,000 – 500,000 ดัลตัน ไม่ให้ผ่านเมมเบรนออกไป จึงไม่ค่อยมีความแตกต่างในความดันออสโมติกคร่อมเมมเบรน ดังนั้นจึงสามารถทำงานที่ความดันในช่วง 2 – 10 บาร์ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันมักทำให้มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร โดยมีขนาดรูพรุน 30 – 400 อังสตรอม อยู่ที่ผิวหน้าเพียง 0.1 – 1.5 ไมครอน การระบุลักษณะสมบัติของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเป็นเช่นเดียวกับไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนคือ ค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน (Trans-membrane flux) ขนาดรูพรุน (Pore size) ความพรุน (Porosity) โครงสร้างของเมมเบรน (Morphology) ค่าการคงอยู่ของตัวละลาย (Retention factor) ค่า Molecular weight cutoff สมบัติความชอบ/ไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน (Chemical and Thermal Stability) และการทำความสะอาดได้ (Cleanability) โพลีเมอร์ที่ใช้เตรียมเป็นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ โพลีซัลโฟน, เซลลูโลสแอซีเตต, โพลีโพรพิลีน, ไนลอน 6, โพลีเอทิลีนเทราฟลูออโรเอทิลีน, โพลีไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น โมดูลของอัลตราฟิลเตรชันที่มีขายในปัจจุบันมีทุกลักษณะ ได้แก่ แบบแผ่น (Plate and frame) แบบท่อม้วน (Spiral wound) แบบท่อ (Tubular) และแบบเส้นใย (Hollow fiber) ไม่ว่าจะ เป็นโมดูลแบบไหนเพื่อให้มีการถ่ายโอนมวลมากที่สุด จำเป็นต้องให้มีความเร็วแนวสัมผัส หรือ แรงเฉือนบริเวณผิวหน้าเมมเบรนมากที่สุด วิธีที่ง่ายที่สุดคือการป้อนสาร (Feed) เข้าไปตามแนวขวาง (Cross flow) กล่าวคือป้อนสารในทิศทางก้ำไหลขนานกับผิวหน้าของเมมเบรนและเพอร์มิเอตผ่านเมมเบรนในแนวตั้งฉากกับเมมเบรน

2.4.2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

1. ความเร็วของสารป้อนที่ผิวเมมเบรน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น Permeate rate จะเพิ่มขึ้น ช่วยลดการเกิดการอุดตัน (Fouling) ที่ผิวของเมมเบรน แต่ต้องใช้พลังงานมากขึ้นและใช้ปั๊มตัวใหญ่ขึ้น
2. ความดัน โดย Permeate rate เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันที่ให้แก่ระบบ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดัน ทำให้เกิดการอุดตัน (Fouling) และการอัดตัวของ

เมมเบรน (Compaction) สูงขึ้น นอกจากนั้นยังมีข้อจำกัดเรื่องความแข็งแรงของเมมเบรนในโมดูลบางแบบ เช่น Capillary type

3. อุณหภูมิ โดย Permeate rate สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิไม่ได้เป็นตัวแปรที่ถูกควบคุม แต่สิ่งสำคัญคือ ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์เพื่อให้สามารถวินิจฉัยได้ว่าการลดลงของฟลักซ์เนื่องมาจากผลของอุณหภูมิหรือผลของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ

2.4.2.2.2 การประยุกต์ใช้อัลตราฟิลเตรชัน

- การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียของอิมัลชันน้ำมัน (Oil emulsion waste treatment)
- การเพิ่มความเข้มข้นของแมโครโมเลกุลชีวภาพ (Concentration of biological macromolecules)
- การแยกสีเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (Electro coat paint recovery)
- การเพิ่มความเข้มข้นของสารเคลือบแป้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Concentration of textile sizing)
- การแยกโปรตีนจากพืช สาหร่าย หรือแพลงก์ตอน (Protein harvesting, useful for grass proteins, algal/plankton proteins)
- การเพิ่มความเข้มข้นของเลือด (Blood concentration)

2.4.2.2.3 การเกิดฟาวลิงและโพลาไรเซชันความเข้มข้น (Fouling and Concentration Polarization)

Concentration polarization เป็นปรากฏการณ์ปกติของกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้แรงดัน คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ เมื่อตัวละลายเกิดการสะสมกันอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ไม่หลุดผ่านเมมเบรนออกไปสูงกว่าความเข้มข้นในเนื้อสารละลาย ก่อให้เกิดชั้นขอบ (Boundary layer) ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟาวลิง (Fouling) หรือการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเมมเบรน กล่าวคือ ค่าฟลักซ์การซึมผ่าน (Flux) และ ค่าการเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Selectivity) ลดลง รูปแบบการเกิดการอุดตัน (Fouling) มีทั้งหมด 4 รูปแบบ (Shi และคณะ, 2014)

1. การดูดติดที่ผิว (Adsorption) การดูดตันของการดูดติดที่ผิวเมมเบรนเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างมลสารในน้ำเสียดกับเมมเบรน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา 3 รูปแบบ คือเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างอ่อน (Van Der Waals forces), เกิดการดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic attraction) และพันธะเคมีของหมู่ฟังก์ชัน ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดชั้นบางๆ (monolayer) ที่ผิวเมมเบรน ซึ่งมีผลต่อการแยกสารแมโครโมเลกุล (Macromolecule) ที่มากับน้ำเสีย เช่น โปรตีน กรดฮิวมิก โดยสารโมเลกุลใหญ่ดังกล่าวจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการดูดตันที่ผิว เมมเบรนและไม่สามารถกำจัดออกได้ด้วยสารเคมี

2. การดูดตันที่รู (Pore blockage) เกิดจากการสะสมของ มลสารหรืออนุภาค คอลลอยด์ในรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงการกรองระยะแรกๆ ขณะที่เมมเบรนยังไม่มีมลสารในรูพรุน

3. การเกิดชั้นเค้ก (Cake formation) เกิดจากมลสารมาสะสมอยู่รวมกันที่บริเวณผิวของเมมเบรนเกิดเป็นชั้นเค้กต้านทาน หรือ Cake resistance ชั้นเค้กต้านทานดังกล่าวมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของมลสารในน้ำเสีย การมีชั้นเค้กต้านทานจะส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่าน (Permeate flux) ของเมมเบรนมีค่าลดลง แต่การมีชั้นเค้กต้านทานนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง เนื่องจากชั้นเค้กจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองอีกชั้นหนึ่งทำให้สามารถดักจับอนุภาคหรือมลสารขนาดเล็กได้

4. การเกิดชั้นเจล (Gel formation) เกิดจากการรวมตัวของสารแมโครโมเลกุลที่มีความเข้มข้นสูงในบริเวณผิวหน้าเมมเบรนกลายเป็นชั้นเจล ซึ่งการรวมตัวดังกล่าวเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization

ในการอธิบายปรากฏการณ์ Concentration polarization ที่ง่ายที่สุดคือการใช้ทฤษฎีชั้นฟิล์ม (Film model) กรณีที่ไม่มีการตกสะสมของตัวละลาย การอธิบายด้วย Film model จะสมมติให้มีชั้นขอบลามินาร์ (Laminar boundary layer) เกิดที่ผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งมีเฉพาะการถ่ายโอนมวลในทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าของเมมเบรนเท่านั้น ที่สภาวะคงตัว (Steady state) การเคลื่อนที่แบบการพา (Convection transport) ของตัวละลายไปยังผิวหน้าของเมมเบรน จะเกิดดุลถ่วง (Counterbalance) กับ ค่าฟลักซ์แพร่ (Diffusion flux) ของสารที่ค้างอยู่ที่ผิวหน้าเมมเบรน (Retained materials) กลับเข้าไปในเนื้อของสารละลายโดยการแพร่ นอกจากนี้การเพิ่ม

แรงดันจะทำให้ค่าฟลักซ์ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้นชั่วคราวเท่านั้น เพราะแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการพาตัว ทำละลายไปค้างอยู่ที่ผิวเมมเบรนมากขึ้นโดยไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลกลับเข้าไปใน เนื้อสารละลาย เกิดการสะสมของตัวละลายเป็นชั้นแค้กหนาขึ้น และเพิ่มความต้านทานการไหลจนค่า ฟลักซ์ลดลงกลับมาค่าเดิม ดังนั้นวิธีเพิ่มฟลักซ์ของกระบวนการใช้แรงดันที่อาจเกิดขึ้นแค้ก คือ การลด ความหนาของชั้นแค้กหรือลดความเข้มข้นของตัวละลายในเนื้อสารละลาย ดังนั้นชั้นแค้กไม่เพียงแต่ทำ ให้ฟลักซ์ลดลงเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อสมบัติการแยกของเมมเบรนอีกด้วยโดยชั้นแค้ก ที่เกิดขึ้นทำหน้าที่ เสมือนเป็นชั้นเมมเบรนอีกชั้นหนึ่งทำหน้าที่ในการดักจับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เป้าหมายใน การแยกองค์ประกอบที่ต้องการผิดไป

ความแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์ Concentration polarization และ Membrane fouling คือ Concentration polarization เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ (Reversible process) เกิดขึ้นในเวลาไม่กี่วินาทีและสามารถควบคุมได้โดยการออกแบบให้เหมาะสม ขณะที่ Membrane fouling ถือเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) เมื่อเกิดการลดลง ของค่าฟลักซ์ขึ้นแล้ว ค่าฟลักซ์จะลดลงเรื่อยๆ การเกิดการอุดตันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบและความเข้มข้นของสารป้อน (Feed) สมบัติวัสดุของเมมเบรน และการออกแบบเชิง พลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic system design) สาเหตุการเกิดการอุดตันอาจมาจากการ สะสมของอนุภาคหรือมลสารที่ไม่ละลาย หรือดูดซับแบบผันกลับได้หรือผันกลับไม่ได้ของ องค์ประกอบที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ความพรุนของเมมเบรนประเภทไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันใช้ ประโยชน์ในการดักจับและกรองมลสารในน้ำเสียโดยใช้กลไกการร่อนโดยเมมเบรน (Sieving) ซึ่ง โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจะถูกดักและถูกแยกออกไป ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ อธิบายกลไกดังกล่าวจะใช้ค่าฟลักซ์การซึมผ่านของเมมเบรนตามกฎของ Darcy (Darcy's Law) ตาม สมการที่ 2.4 (Basile, Cassano และ Rastogi, 2015)

$$J = P \cdot (p_f - p_p) = P \cdot \Delta p \quad (2.4)$$

เมื่อ P = Permeability coefficient ($\text{m}^3/\text{s m}^2 \text{ atm}$)

p_f = Feed pressure (atm)

P_p = Permeate pressure (atm)

Δp = Transmembrane pressure (atm)

โดยค่า P ขึ้นอยู่กับลักษณะของเมมเบรน (เช่น ความพรุน หรือ Pore size distribution) และสมบัติการซึมผ่าน (เช่น ความหนืด) วิธีการกำหนดค่าคงที่ของการซึมผ่าน หรือค่า P มี 2 วิธี วิธีแรกคำนวณจากสมการของ Hagen-Poiseuille (สมการที่ 2.5) โดยสมมติให้ลักษณะเมมเบรนเป็นแบบ uniform capillaries

$$v = \frac{D^2}{32\mu L} (p_f - p_p) \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 3.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$J = \frac{\epsilon D^2}{32\mu\tau} \frac{\Delta p}{L} \quad (2.6)$$

เมื่อ D = Pore diameter (m.)

L = Length of pore (m.)

μ = viscosity (kg/s m.)

ϵ = Porosity of membrane

T = Tortuosity of membrane

ในความเป็นจริงรูปร่างของรูเมมเบรนนั้นไม่ได้เป็นรูปทรงกระบอกมาตรฐาน หรือมีลักษณะตรง ดังนั้นการคำนวณจึงใช้การสมมติว่ารูเมมเบรนมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งจะใช้สมการของ Carman-Kozeny ในการอธิบายค่าฟลักซ์ของเมมเบรนตามสมการที่ 2.7

$$J = \frac{\varepsilon^3}{K\mu S^2(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta p}{L} \quad (2.7)$$

เมื่อ S = Specific area (m^2/m^3)

อย่างไรก็ตามทั้งสมการของ Hagen-Poiseuille และ Carman-Kozeny เป็นสมการในอุดมคติเพราะว่าลักษณะจริงของเมมเบรนจะเบี่ยงเบนไปตามสมมติฐาน ดังนั้นสมการที่เป็นที่ยอมรับในการใช้อธิบายค่าฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการของไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันคือ Osmotic pressure model ดังสมการที่ 2.8

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu R_m} = \frac{\Delta p}{\mu R_m} \quad (2.8)$$

เมื่อ $\Delta \pi$ = Transmembrane osmotic pressure (atm)

R_m = Membrane resistance (1/m)

เนื่องจากผลของความดันออสโมติกต่อกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันมีค่าน้อยมาก จึงสามารถตัดค่าความดันออสโมติกทิ้งไปโดยไม่ต้องนำมาคำนวณ การที่จะพิจารณาประสิทธิภาพของเมมเบรนให้แม่นยำ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเรื่องการอุดตัน (Fouling) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการกรองน้ำด้วยเมมเบรน ดังนั้นสมการที่ 2.8 จึงได้มีการจัดรูปสมการเพื่อคำนวณการเกิดการอุดตันที่เมมเบรนเรียกว่า Resistance in series model (สมการที่ 2.9) เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดัน

$$J = \frac{\Delta p}{\mu(R_m + R_t)} \quad (2.9)$$

โดยที่

$$R_t = R_{ad} + R_{cp} + R_f \quad (2.10)$$

เมื่อ R_{ad} = Adsorption resistance

R_{cp} = Concentration polarization resistance

R_f = Fouling resistance

โดย R_f แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบผันกลับได้ (Reversible fouling) และแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible fouling) แบบผันกลับได้หมายถึงการอุดตันของมลสารที่ไม่เกาะติดแน่นที่เมมเบรน สามารถกำจัดออกได้ด้วยการฉีดน้ำ (Flushing) ส่วนแบบผันกลับไม่ได้หมายถึงมลสารเกาะติดแน่นที่เมมเบรน (เช่น อุดตันที่รู หรือ เกิดชั้นไบโอฟิล์ม เป็นต้น) ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกโดยการฉีดน้ำได้ (Choi และคณะ, 2005)

นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเมมเบรน สามารถคำนวณได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์การกำจัดมลสาร (foulants) ในน้ำเสีย ตามสมการที่ 2.11

$$R = \frac{C_b - C_p}{C_b} \cdot 100 = \left[1 - \frac{C_p}{C_b} \right] \cdot 100 \quad (2.11)$$

เมื่อ C_b = Feed solute concentration (kg/m^3 , kg mol/m^3)

C_p = Permeate solute concentration (kg/m^3 , kg mol/m^3)

2.4.3 การทำความสะอาดเมมเบรนและการล้างย้อน (Membrane Cleaning and Backwashing)

2.4.3.1 การทำความสะอาดเมมเบรน (Shi และคณะ, 2014)

นิยามการทำความสะอาด หมายถึง กระบวนการในการกำจัดมลสารออกจากวัสดุนั้นๆ โดยที่มลสารไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุนั้นๆ ซึ่งการทำความสะอาดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

2.4.3.1.1 การทำความสะอาดทางกายภาพ (Physical cleaning)

การทำความสะอาดทางกายภาพเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) หรือการทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบ เพื่อให้เกิดแรงทางจลศาสตร์ในการกำจัดมลสารออกจากเมมเบรน โดยแรงที่เกิดขึ้นมีทั้งหมด 3 แรง คือ แรงดันน้ำ (Hydraulic), แรงเชิงกล (Mechanical) และแรงทางไฟฟ้า (Electrical) ทั้งแรงดันน้ำและแรงเชิงกลจะก่อให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ขึ้นที่ผิวของเมมเบรน ส่งผลให้มลสารที่เกาะที่ผิวเมมเบรนคลายตัวและหลุดออกไป โดยการทำความสะอาดที่เกี่ยวข้องกับแรงดังกล่าว เช่น การล้างย้อน (Backwashing) โดยใช้แรงดันสวนทางการไหลของน้ำเสีย การใช้งานหมุนเพื่อสร้างความปั่นป่วนที่ผิวเมมเบรน หรือการใช้อากาศ หรือพองน้ำเพื่อเป็นแรงเชิงกลในการกำจัดมลสาร เป็นต้น สำหรับแรงทางไฟฟ้าจะใช้ความต่างศักย์ในการกำจัดมลสาร

2.4.3.1.2 การทำความสะอาดทางเคมี (Chemical cleaning)

การทำความสะอาดทางเคมีจะใช้กับการอุดตันแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ซึ่งหมายถึงมลสารติดแน่นที่ผิวเมมเบรนจนไม่สามารถกำจัดออกโดยวิธีทางกายภาพได้ สารเคมีที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารออกซิแดนท์ (Oxidants) ถูกใช้เพื่อกำจัดเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ต่างๆ การทำความสะอาดทางกายภาพมีทั้งแบบทำความสะอาดในระบบ (Cleaning in place) คือ การใส่สารทำความสะอาดเข้าทางป้อน (Feed) แทนน้ำเสีย และแบบทำความสะอาดนอกระบบ (Cleaning out of place) คือการนำเมมเบรนออกจากระบบโมดูลแล้วนำไปแช่ในถังที่มีสารทำความสะอาด สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนแบ่งได้เป็น 6 กลุ่ม

1. สารประเภทกรด (Acids) ใช้กำจัดสารอุดตันประเภทเกลืออนินทรีย์และโลหะออกไซด์ ตัวอย่างสารทำความสะอาดประเภทกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

กรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นต้น โดยกรดไนตริกนิยมนำมาใช้กำจัดตะกอนแคลเซียมในโรงงาน เนื่องจากกรดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกรดแรงซึ่งมีประสิทธิภาพในการกัดกร่อนสารอุดตันได้ดี แต่ก็มีผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจทำให้เมมเบรนเกิดการกัดกร่อนได้ จึงมีการใช้กรดอ่อนเช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือกรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) ซึ่งมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์รักษาระดับค่าพีเอช (pH) ในระบบ และมีการกัดกร่อนน้อยกว่า แต่ข้อเสียคือ มีราคาแพง

2. สารประเภทด่าง (Alkalis) สารทำความสะอาดประเภทต่างแ่งที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ใช้ในการสลายโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ ให้กลายเป็นโมโนเมอร์ รวมไปถึงใช้สะเทินกรดอินทรีย์ได้ ส่วนสารประเภทด่างอ่อนที่นิยมใช้ เช่น โซดาแอช (Na_2CO_3) โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นต้น ข้อเสียของการใช้ด่างอ่อนคือ ก่อให้เกิดเกลือโลหะที่ไม่ละลายน้ำซึ่งมีผลต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นสาเหตุให้เกิด Eutrophication ได้

3. สารออกซิแดนท์ (Oxidants) สารออกซิแดนท์ที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และกรดเปอร์อะซิติก (CH_3COCOOH) สารออกซิแดนท์ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค หรือจุลินทรีย์ต่างๆในระบบผลิตน้ำประปาหรือระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังมีการใช้สารออกซิแดนท์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา เป็นต้น โซเดียมไฮโปคลอไรด์เป็นสารที่นิยมใช้มากที่สุด เมื่อละลายน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) ซึ่งสารตัวนี้อาจส่งผลให้เมมเบรนเกิดความเสียหาย และทำให้เมมเบรนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

4. สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เป็นสารที่ใช้ลดแรงตึงผิวในภูมิภาคของเหลว-ของเหลว หรือ ของเหลว-ของแข็ง โดยสารลดแรงตึงผิวจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว (Dispersants), สารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier), สารซักล้าง (Detergents), สารดูดซับน้ำ (Wetting agents) และสารฆ่าเชื้อโรค (Biocides) ซึ่งจะทำให้มลสาร เช่น โปรตีน มีสมบัติการละลายน้ำและเกิดการกระจายตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ผิวเมมเบรนมีอัตราการดูดซับน้ำ (Wettability) มากขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาในการล้างเมมเบรน และลดการใช้น้ำได้ สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ สารประจุบวก (Cationic) สารประจุลบ (Anionic) สารไม่มีประจุ (Nonionic) และ สารที่มีทั้งสองขั้ว (Zwitterionic) โดยกลุ่มที่นิยมใช้ในระบบการกรองด้วยเมมเบรนคือ กลุ่มสารประจุลบ และกลุ่มสารไม่มีประจุ

5. สารคีแลนท์ (Chelants) สารในกลุ่มนี้ที่เป็นที่รู้จักกันคือเอทิลีนไดเอมีน เตตระอะซีติกแอซิด หรือ EDTA เป็นสารเชิงซ้อนของโลหะไอออน เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) สารคีแลนท์ใช้ในการกำจัดมลสารที่มีความคงทน ถูกกำจัดออกยาก โดยประสิทธิภาพการกำจัดด้วย EDTA ขึ้นอยู่กับช่วงค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสม

6. สารกลุ่มเอนไซม์ (Enzymes) ใช้กำจัดมลสารประเภทสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน ไขมัน เป็นต้น หรือกำจัดไบโอฟิล์มที่ผิวเมมเบรน เอนไซม์ที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ protease lipases เป็นต้น เอนไซม์เป็นสารทำความสะอาดที่ดีที่สุดทั้งหมด 6 กลุ่ม เนื่องจากการใช้เอนไซม์ทำความสะอาดเมมเบรนจะช่วยยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน เพราะเอนไซม์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก และที่ค่าพีเอชกลางๆ ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายต่อเมมเบรน รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเอนไซม์ถูกย่อยได้ด้วยจุลินทรีย์

2.4.3.2 กระบวนการล้างย้อน

กระบวนการล้างย้อน หรือ Backwashing เป็นวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนวิธีหนึ่งโดยอาศัยหลักการสวนกระแส (Reverse flow) จากทิศทางการเดินระบบปกติ โดยใช้น้ำหรืออากาศไล่จากด้านเพอร์มิเอต (Permeate) ไปยังด้านสารป้อน (Feed) ผลจากการล้างย้อนทำให้มลสารที่ตกค้างในรูพรุนของเมมเบรนหลุดออกได้ ค่าฟลักซ์ที่ต้องใช้ในกระบวนการล้างย้อนต้องมากกว่าค่าฟลักซ์ในกระบวนการกรองปกติประมาณ 2 เท่าจึงต้องระมัดระวังไม่ให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงเกินไปซึ่งอาจส่งผลให้เมมเบรนเกิดความเสียหายได้ (Shi และคณะ, 2014)

อัตราการล้างย้อนจะแสดงในหน่วยของอัตราการไหลต่อพื้นที่ผิว หรือความเร็ว น้ำที่เพิ่มขึ้น เช่น ฟุตต่อวินาที หรือ นิ้วต่อวินาที เป็นต้น อัตราการล้างย้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น การออกแบบ อุณหภูมิ ชนิดของเมมเบรน วิธีล้างย้อน เป็นต้น โดยถ้าอุณหภูมิของน้ำเสียเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลง หรือ อัตราการล้างย้อนที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้เมมเบรนขยายตัวได้ (ศักดิ์สิทธิ์ อิมแมน, 2551)

Chang และคณะ (2016) ได้ศึกษาวิธีการล้างย้อนในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด Flat sheet จากการอุดตันของโซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate) โดยได้ประเมินประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยการศึกษาค่า Transmembrane pressure buildup (TMP

Buildup), ค่า Hydraulic cleaning efficiency (HCE) และค่า Hydraulically irreversible fouling index (HIFI) ซึ่งคำนวณได้จากการถอดตันแบบผันกลับได้หลังจากรอบการกรองจำนวน n รอบ ดังสมการที่ 2.12

$$HCE = \sum_{n=1}^k \frac{HCE(n)}{k} = \frac{(TMP_f^n - TMP_{ini}^{n+1})}{(TMP_f^n - TMP_{ini}^n)} \quad (2.12)$$

เมื่อ TMP_{ini}^n = Initial TMP value of cycle n

TMP_f^n = Final TMP value of cycle n

TMP_{ini}^{n+1} = Initial TMP value of cycle n+1

ค่า HIFI ซึ่งใช้ระบุระดับการถอดตันบนอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนหลังจากการทำ hydraulic cleaning สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$\frac{1}{J'_s} = 1 + (HIFI)V_s \quad (2.13)$$

โดยที่ J'_s = $(J/TMP_{ini})/(J/TMP_0)$ = TMP_0/TMP_{ini}

เมื่อ TMP_0 = TMPs of virgin membrane (KPa)

TMP_{ini} = Initial TMPs after backwashing (KPa)

V_s = Volume filtered per unit membrane area (L/m^2)

นอกจากนี้การล้างย้อนยังส่งผลให้เกิดแรงเฉือนที่บริเวณผิวของเมมเบรน ผลของแรงเฉือนทำให้ชั้นเค้กที่สะสมที่ผิวเมมเบรนรวมไปถึงการถอดตันในรูของเมมเบรนหลุดออกได้ สมการที่ใช้คำนวณแรงเฉือนเป็นไปตามสมการที่ 2.14 (ศักดิ์สิทธิ์ อิมแมน, 2551)

$$\tau_w = d_H \frac{p_i - p_o}{4L} \quad (2.14)$$

เมื่อ	τ_w	=	Shear stress (Pa)
	p_i	=	Inlet pressure (Pa)
	p_o	=	Outlet pressure (Pa)
	L	=	Length of flow channel (m)
	d_H	=	Hydraulic diameter (m)

โดย d_H สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.15

$$d_H = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (2.15)$$

เมื่อ	a	=	Width of flow channel (m)
	b	=	Height of flow channel (m)

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณแรงเฉือนได้จากสมการที่ 3.16

$$\tau_w = \mu\gamma \quad (2.16)$$

เมื่อ	μ	=	Dynamic viscosity (Pa.s)
	γ	=	Shear rate (s^{-1})

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Barredo-Damas และคณะ (2010) ได้ศึกษาลักษณะของเซรามิกเมมเบรน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองมีค่า Molecular weight cutoff (MWCO) 3 ค่า คือ 30, 50 และ 150 KDa และศึกษาผลของค่า Cross-flow velocity (CFV) ที่ความเร็ว 3, 4 และ 5 m/s จากการศึกษาพบว่าค่า MWCO และ CFV มีความสัมพันธ์กัน โดยถ้าค่า MWCO มากขึ้นค่า CFV ที่ใช้ย่อมต้องมากขึ้นเพื่อลดการเกิดชั้นเค้กที่ผิวของเมมเบรน นอกจากนี้ค่า MWCO และ CFV ยังมีผลต่อการกำจัดสีและความขุ่นในน้ำเสีย โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีและความขุ่นจะมากที่สุดที่ MWCO 30 KDa และ CFV 3 m/s

ต่อมา Barredo-Damas และคณะ (2012) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เซรามิกเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยกำหนดค่า CFV ไว้ที่ 3 m/s และทำการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรนในช่วง 1-4 bar และค่าพีเอช (pH) 8, 10 และ 12 เพื่อดูสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของเมมเบรน (Membrane rejection) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความดันทรานส์เมมเบรนมีค่าอยู่ในช่วง 3-4 bar และค่าพีเอชเท่ากับ 8

Anis, Kayar และ Eren (2007) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเดินระบบ รวมไปถึงผลของสารหล่อลื่นต่อการนำน้ำที่มีสารเคลือบแป้ง (Sizing agents) กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยสารเคลือบแป้งที่นำมาศึกษามี 3 ชนิด คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA), โพลีอะคริเลต (Polyacrylate: PAC) และ คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช (Carboxymethylstarch: CMS) จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเดินระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณ concentrated ที่เกิดจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับสารเคลือบแป้ง PVA และ PAC โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 90°C และ ระยะเวลาเดินระบบ 240 นาที ผลของสารหล่อลื่นต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันพบว่า การเติมสารหล่อลื่นส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันลดลงในสารเคลือบแป้งทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาค่าซีไอดี หลังกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าในชุดการทดลองของสารเคลือบแป้งทั้ง 3 ชนิด ทั้งที่มีการเติมสารหล่อลื่นและไม่มีการเติมสารหล่อลื่นสามารถบำบัดค่าซีไอดีได้ประมาณ 80-90% โดยที่อุณหภูมิ 90°C จะมีอัตราการบำบัดค่าซีไอดีน้อยที่สุด

S.H. Lin และ Lan (1995) ได้ศึกษาการนำสารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยทำการทดลองแบบที่ละเท การทดลองได้ศึกษาชนิดของเมมเบรน (Hydrophilic และ Hydrophobic), molecular weight cutoff (MWCO) 2 ค่าคือ 30,000 และ 100,000 รวมไปถึงสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ พบว่าเมมเบรนชนิด hydrophilic มีประสิทธิภาพดีกว่าเมมเบรนชนิด Hydrophobic ในแง่ของการนำสารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ MWCO ที่เหมาะสมคือค่าที่น้อยที่สุด (ในที่นี้คือ 30,000) เนื่องจากสามารถดักจับสารพีวีเอได้ความเข้มข้น (concentrate) มากสุด สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ ความดันควรมีค่าประมาณ 0.2 MPa อุณหภูมิ 80°C และมีการกวนผสมอยู่ที่ 200 rpm เพื่อป้องกันการอุดตันและการเกิด concentration polarization ที่ผิวเมมเบรน

นอกจากนี้ Saleh และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลของสาร Carboxymethyl cellulose (CMC) ต่อการนำสารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของเมมเบรนชนิด Polyethersulfone (PES) แบบเส้นใยกลวง ภายใต้สภาวะที่กำหนด ความดันที่ผ่านเมมเบรน 1.0 ถึง 2.1 bar อุณหภูมิของน้ำเสียในช่วง 50 ถึง 75°C และอัตราการป้อนสารเข้า (Feed velocity) 0.16 ถึง 0.32 m/s พบว่าการมีปริมาณสาร CMC ที่มากขึ้น จะลดประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของสารพีวีเอในน้ำเสียสังเคราะห์คือมีค่า PVA concentration น้อยลง นอกจากนี้ที่สภาวะความดัน 2.1 bar อุณหภูมิ 75°C และอัตราการป้อนสารเข้า 0.32 m/s จะมีค่า PVA concentration มากที่สุด

การศึกษาของ Choo, Choi และ Hwang (2007) เกี่ยวกับผลของสารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการร่วม โคแอกกูเลชัน และ อัลตราฟิลเตรชัน จากการศึกษาพบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถกำจัดความขุ่นได้ 95% แต่กำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon: TOC) ได้เพียง 40% นอกจากนี้การใช้สารสร้างตะกอนกลุ่มโพลีเอมีนในปริมาณสูง (ประมาณ 4 mg/L) เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดจากส่วนที่เหลือของสารโพลีเมอร์ (Residual polymer) ผลของการใช้สารสร้างตะกอนในกลุ่มของเกลืออนินทรีย์ซึ่งในการทดลองนี้ศึกษา สารส้ม (Alum) เฟอริกคลอไรด์ (FeCl₃) และ โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) พบว่าโพลีลูมิเนียมคลอไรด์เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการลดการเกิดการอุดตันแม้จะมีความเข้มข้นเพียง 1 mg/L และสามารถควบคุมค่าความดันให้มีค่าต่ำกว่า 0.3 bar ตลอดช่วงการเดินระบบ เมื่อเทียบกับสารส้มและเฟอริกคลอไรด์

Lee และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลของค่า ionic strength ต่อความเข้มข้นของโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการอุดตันที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน และ อัลตราฟิลเตรชัน รวมไปถึงศึกษาลักษณะของชั้นเค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวเมมเบรนด้วยการใช้กล้อง SEM (Scanning electron microscope) หลังจากการใช้สารสร้างตะกอนโพลี-ออลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าถ้าน้ำเสียนี้อาณา ionic strength มากปริมาณโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ต้องมากขึ้นเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำเสีย ทั้งนี้ถ้าความเข้มข้นของโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์มากเกินไปจะส่งผลให้ผิวเมมเบรนเกิดขึ้นเค้กมากขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ Harrelkas และคณะ (2009) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคกูเลชัน ร่วมกับการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เมมเบรน ผลการทดลองพบว่าสภาวะและปริมาณที่เหมาะสมของการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคกูเลชันจากการทำจาร์เทส (Jar test) คือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม (อลูมิเนียมซัลเฟต, $Al_2(SO_4)_3$) 100 mg/L และปริมาณสารที่ช่วยให้เกิดฟลอคเท่ากับ 4 mg/L สำหรับการทดลองเดินระบบของกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคกูเลชันร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดีเท่ากับ 74%

การศึกษาของ Hwang, Chan และ Tung (2009) เกี่ยวกับผลของการล้างย้อนต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคแป้งสังเคราะห์ที่ทำจาก Polymethyl methacrylate ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเซรามิกเมมเบรนแบบ Submerged โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างย้อนเพื่อดูค่าฟลักซ์ที่เหมาะสมในการล้างย้อน โดยใช้สมการ membrane blocking model รวมไปถึงระยะเวลาการล้างย้อนและระยะเวลาการกรอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการล้างย้อนคือระยะเวลาการล้างย้อน 2 นาที และมีค่าฟลักซ์ในการล้างย้อนเท่ากับ $4.15 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ นอกจากนี้ระยะเวลาในการกรองควรเท่ากับ 30 นาทีเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกรองสูงสุด

Wang, Wang และ Fukushi (2008) ได้ศึกษาผลของการอุดตันของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อศึกษาผลของความดันที่ใช้ในการล้างย้อนและช่วงระยะห่างของการล้างย้อน (Backwash interval) ต่อค่าความดันทรานส์เมมเบรน (TMP) และค่า UV_{254} ที่เป็นตัวชี้วัดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่าช่วงระยะห่างในการล้างย้อนที่เหมาะสม (กำหนดเวลาไว้ที่ 30, 60 และ 120 นาที) ควรอยู่ในช่วง 30-60

นาที่ สำหรับค่าความดันในการล้างย้อน (กำหนดไว้ที่ 100, 200 และ 250 kPa) พบว่าความดันที่เหมาะสมในการเดินระบบมีค่าเท่ากับ 250 kPa โดยที่สภาวะดังกล่าวทำให้ค่า TMP เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ช่วยให้สามารถเดินระบบได้นานมากขึ้น และทำให้ค่า UV_{254} มีค่าน้อยลง ซึ่งหมายถึงสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้

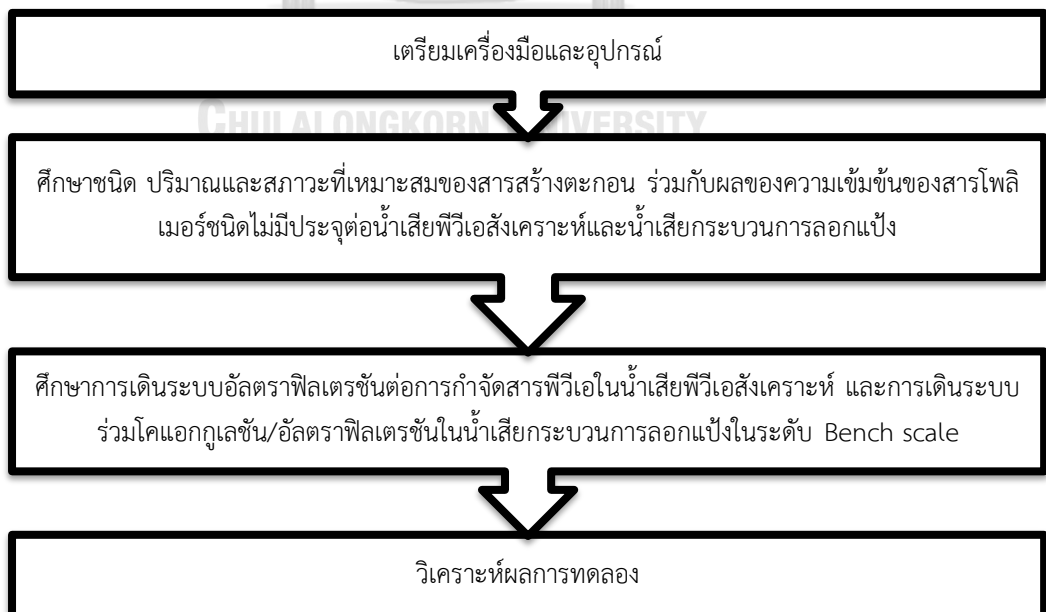


บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของชนิด ปริมาณและค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ โพลีลูมิเนียมคลอไรด์, อลูมิเนียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ ร่วมกับผลของความเข้มข้นของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง รวมไปถึงศึกษาประสิทธิภาพของระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ และศึกษาประสิทธิภาพการเดินระบบร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชันในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง โดยการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งนอกจากจะศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอแล้ว ยังเป็นการกำจัดความขุ่นในน้ำเสีย ก่อนนำน้ำส่วนใสเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนเพื่อลดการอุดตันที่ผิวเมมเบรน (Fouling) โดยระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นระบบชุดทดสอบ (Bench scale) โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.2 คุณสมบัติน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่นำมาใช้ศึกษาเป็นน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอodyอม A ซึ่งมีค่าความเข้มข้นพีวีเอสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้ง (Desizing)

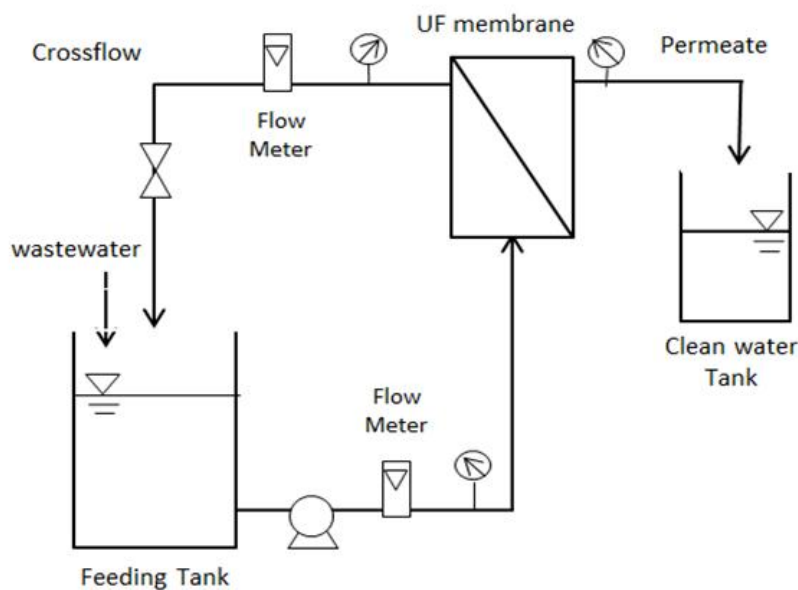
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่วัดได้
ค่าพีเอช	-	5 - 6
ความขุ่น	NTU	250
ค่าซีโอดี	mg/L	50,000 - 60,000
ค่าการนำไฟฟ้า	ms/cm	1.9
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	mg/L	1,000
ความเข้มข้นของสารพีวีเอ	g/L	8-12

3.3 รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยอัลตราฟิลเตรชัน

ในการศึกษานี้จะทำการทดลองหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอนและกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันในระดับ Bench scale

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเมมเบรน

คุณสมบัติ	ระดับ Bench scale
Membrane material	ceramic
Membrane Module	Flat sheet
Pore size or MWCO (kDa)	150 and 300
Membrane Surface Area (cm ²)	52.7
Membrane Diameter (mm.)	90



รูปที่ 3.2 ผังการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลองขนาดทดสอบ (Bench scale)

3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

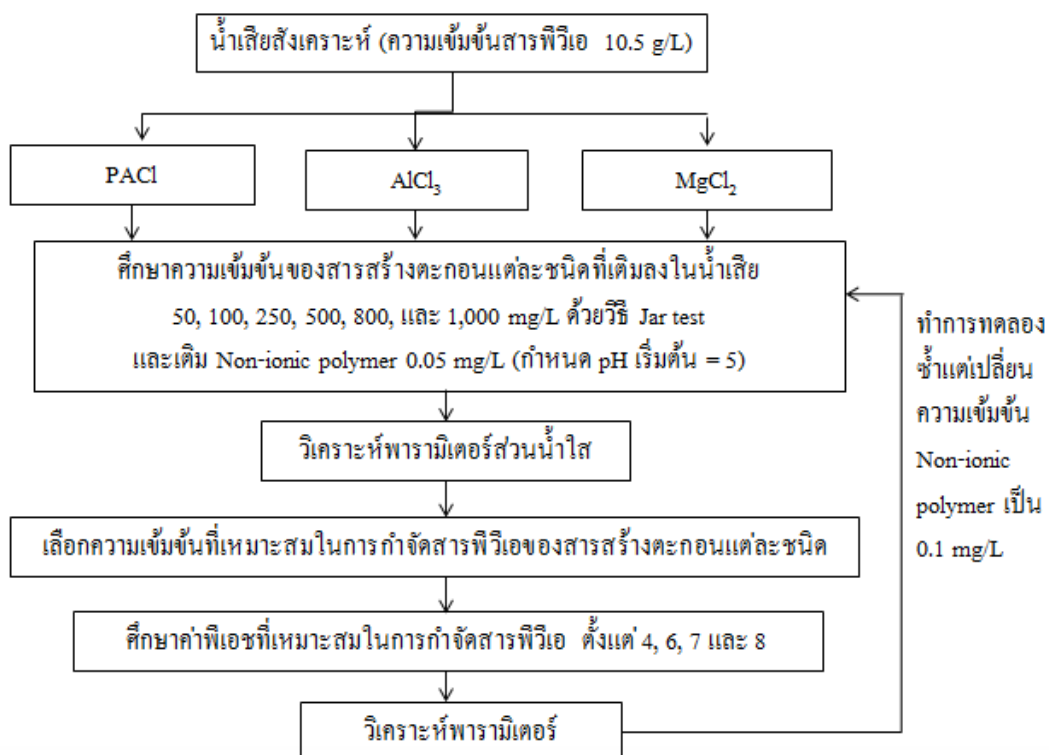
3.4.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมต่อน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้ง (Desizing) ที่มีสารพีวีเอเป็นองค์ประกอบ

การทดลองที่ 1.1 น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

ทำการทดลองหาปริมาณและชนิดของสารสร้างตะกอน (coagulants) ที่เหมาะสมต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารพีวีเอเท่ากับ 10.5 g/L ด้วยการทำ Jar test โดยสารสร้างตะกอนที่นำมาศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride), อลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminium chloride) และ แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride) โดยจะศึกษาช่วงความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนตั้งแต่ 50, 100, 250, 500, 800 และ 1,000 mg/L และช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดตะกอนในช่วงค่าพีเอชตั้งแต่ 4, 6, 7 และ 8 โดยมีการศึกษาพารามิเตอร์ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าซีโอดี, ความเข้มข้นของสารพีวีเอ, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่นในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ก่อนและหลังจากการตกตะกอน

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 1.1

การทดลองที่ 1.1 การหาชนิดของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม	
ตัวแปรคงที่	ความเข้มข้นของสารพีวีเอเริ่มต้น 10.5 g/L ค่าพีเอชเริ่มต้น pH = 5
ตัวแปรอิสระ	ชนิดของสารสร้างตะกอน PACl, AlCl ₃ , MgCl ₂ pH = 4, 6, 7, 8 Coagulant dosage: 50, 100, 250, 500, 800, 1,000 mg/L Polymer dosage: Non-ionic polymer: 0.05, 0.1 mg/L
ตัวแปรตาม	ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ, ค่าความขุ่น, ค่าซีไอดี และความเข้มข้นของสารพีวีเอ



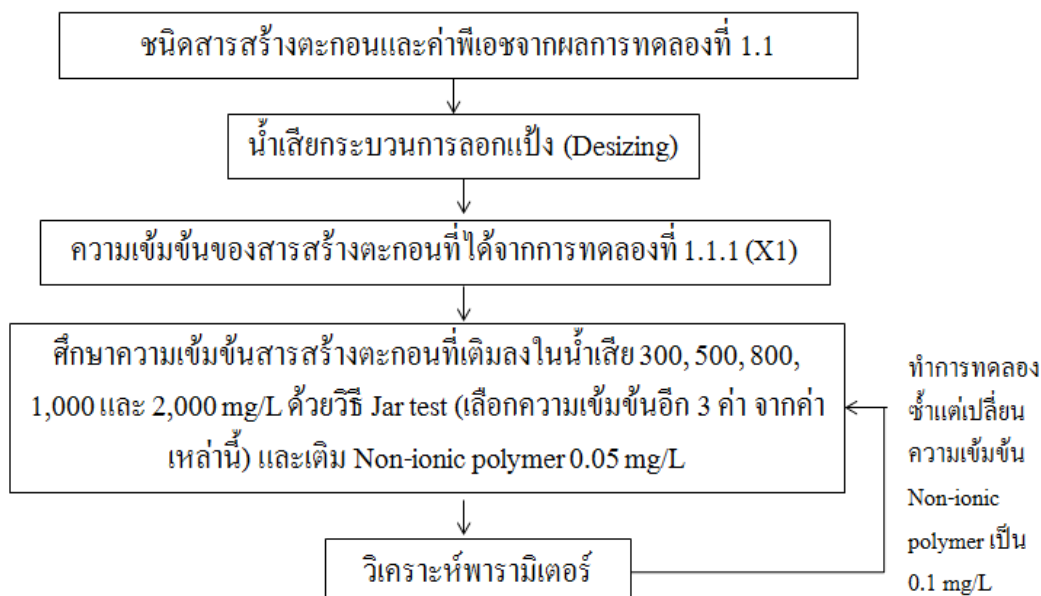
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองที่ 1.1

การทดลองที่ 1.2 น้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

ทำการศึกษาโดยใช้ชนิดของสารสร้างตะกอน และค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.1 โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้ง (Desizing) เมื่อได้ชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.1 (X1) และเลือกความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมอีก 3 ค่า (X2,X3,X4) จากความเข้มข้นในช่วง 100, 300, 500, 800, 1,000, 2,000 mg/L โดยศึกษาพารามิเตอร์ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าความขุ่น, ค่าซีโอดี, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความเข้มข้นของสารพีวีเอ

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 1.2

การทดลอง ที่ 1.2	การหาความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม
ตัวแปรคงที่	<ul style="list-style-type: none"> - ชนิดของสารสร้างตะกอน - ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน (X1) - ค่าพีเอชที่เหมาะสม (เลือกมาจากการทดลองที่ 1.1)
ตัวแปรอิสระ	Coagulant dosage: 100, 300, 500, 800, 1,000, 2,000 mg/L (X2,X3,X4) Polymer dosage: Non-ionic polymer: 0.05, 0.1 mg/L
ตัวแปรตาม	ค่าพีเอช, ค่าความขุ่น, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ, ค่าซีโอดี และความเข้มข้นของสารพีวีเอ



รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองที่ 1.2

3.4.2 การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาสภาวะการเดินระบบและการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนและน้ำเสียจากกระบวนการลอกแป้ง (Desizing) ด้วยกระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชัน ในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนขนาดชุดทดสอบ (Bench scale)

การทดลองที่ 2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆกัน คือ 200, 400, 600, 800, 1000 mg/L ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในชุดทดลองขนาดชุดทดสอบ (Bench scale) โดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่อไปนี้

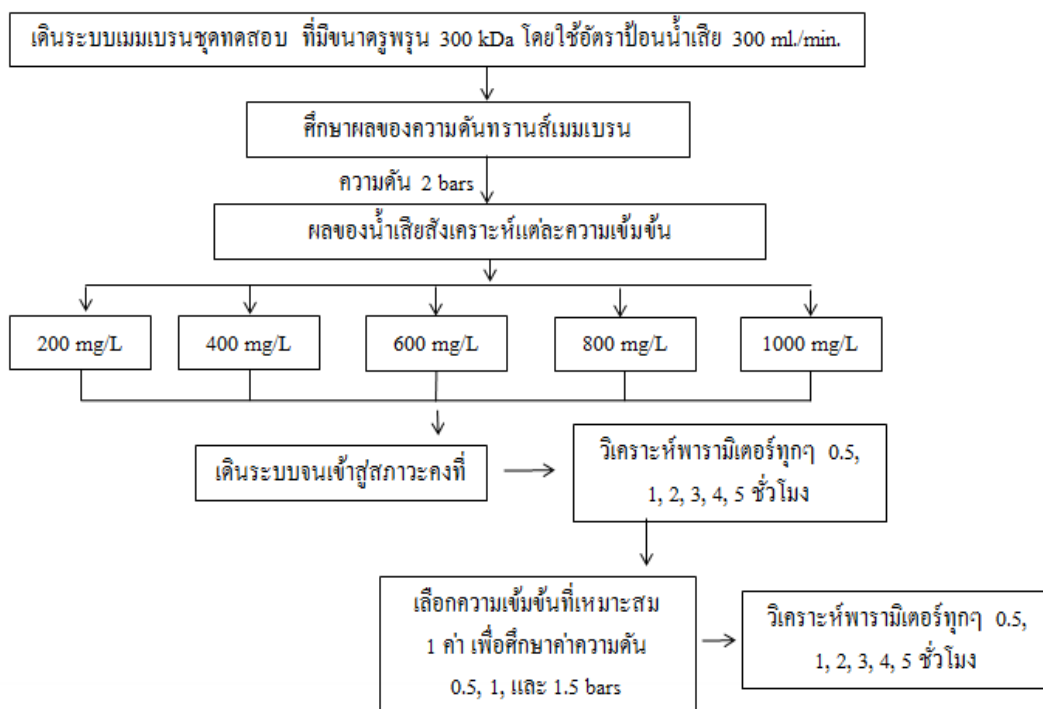
การทดลองที่ 2.1.1 ผลของความดันทรานส์เมมเบรน (Transmembrane pressure) ทั้ง 4 ค่าคือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 bars ที่ขนาดรูพรุน 300 kDa

การทดลองที่ 2.1.2 การกำจัดสารพีวีเอที่ขนาดรูพรุน 150 kDa โดยเลือกค่าความดันทรานส์เมมเบรนจากการทดลองที่ 2.1.1

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 2.1.1

การทดลองที่ 2.1.1	ผลของความดันทรานส์เมมเบรน
ตัวแปรคงที่	- วัสดุกรองแบบ Ceramic - ขนาดรูพรุน (300 kDa)
ตัวแปรอิสระ	- ความเข้มข้นของสารฟีนีล (200, 400, 600, 800, 1000 mg/L) - ความดันทรานส์เมมเบรน (0.5, 1, 1.5, 2 bars)
ตัวแปรตาม	ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ, ค่าความขุ่น, ค่าฟลักซ์, ค่าซีไอดี และความเข้มข้นของสารฟีนีล

การทดลองที่ 2.1.1 นี้จะเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวและเก็บตัวอย่างน้ำหลังเดินระบบที่ช่วงเวลา 30 นาที 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง

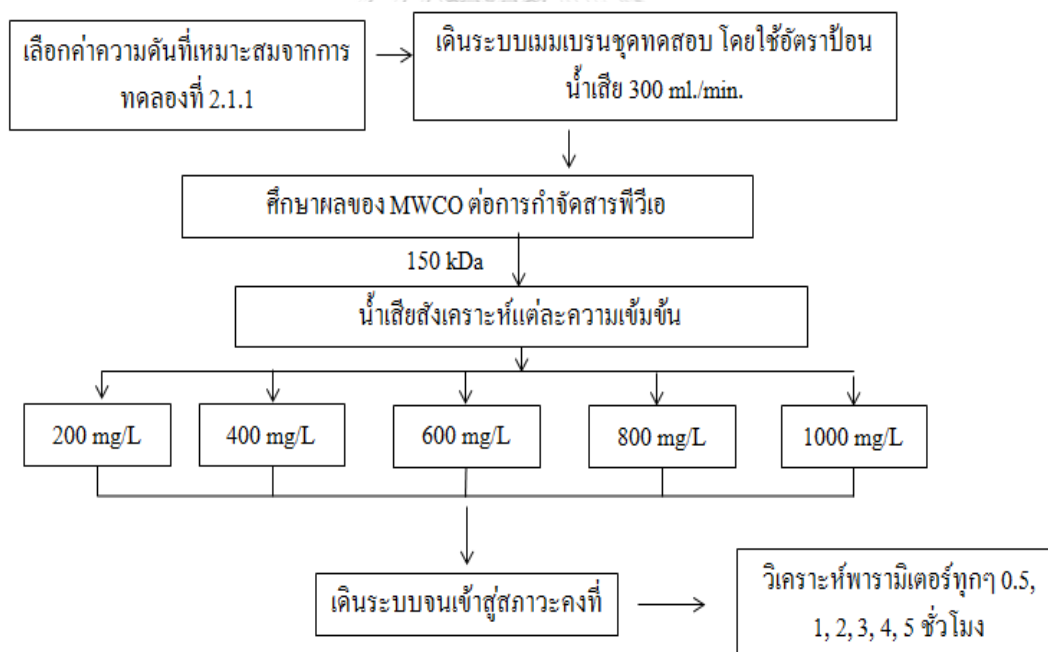


รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลองที่ 2.1.1

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 2.1.2

การทดลองที่ 2.1.2	ผลของขนาดรูพรุน MWCO ที่ต่างกัน
ตัวแปรคงที่	- วัสดุกรองแบบ Ceramic - ความดันทรานส์เมมเบรน (เลือกค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1.1)
ตัวแปรอิสระ	- ความเข้มข้นของสารฟิวีเอ (200, 400, 600, 800, 1000 mg/L) - ขนาดรูพรุน (150 kDa)
ตัวแปรตาม	ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ, ค่าความขุ่น, ค่าฟลักซ์, ค่าซีไอดี และความเข้มข้นของสารฟิวีเอ

การทดลองที่ 2.1.2 นี้จะเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวและเก็บตัวอย่างน้ำหลังเดินระบบที่ช่วงเวลา 30 นาที 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลองที่ 2.1.2

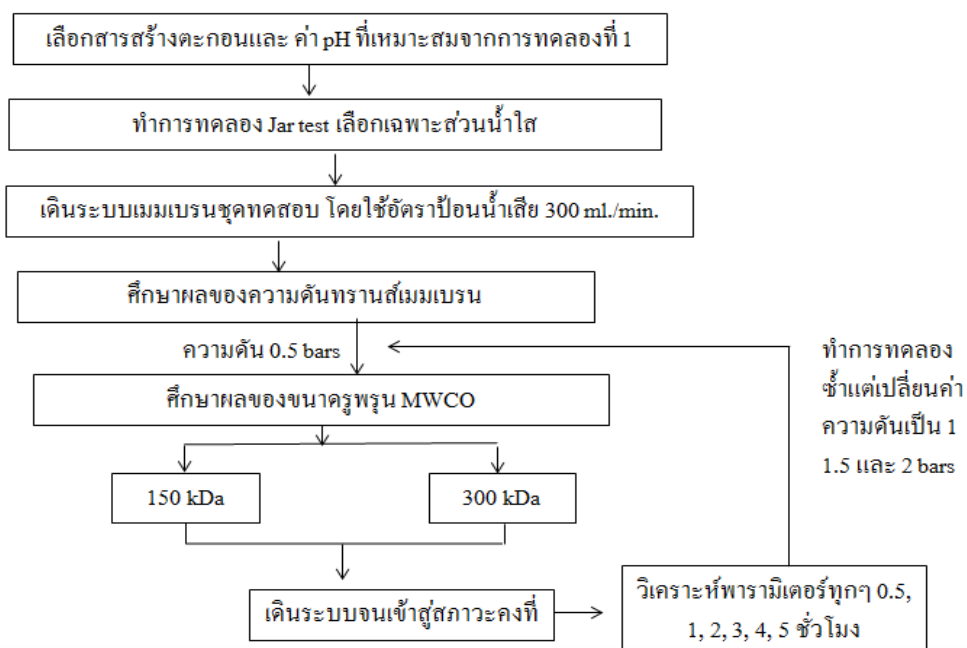
การทดลองที่ 2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารฟิวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งด้วยกระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชันในชุดทดลองขนาดทดสอบ (Bench scale) โดยใน

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เลือกชนิด ปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.2 หลังจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน นำน้ำส่วนน้ำใสเข้าสู่ระบบอัลตราฟิลเตรชัน เมมเบรน โดยศึกษาผลของความดันทรานส์เมมเบรน (Transmembrane pressure) ทั้ง 4 ค่าคือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 bars ที่ขนาดรูพรุน MWCO 150 และ 300 kDa

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในการทดลองที่ 2.2

การทดลองที่ 2.2	ผลของความดันทรานส์เมมเบรนและขนาดรูพรุน
ตัวแปรคงที่	- พื้นที่ผิวของแผ่นเมมเบรนชุดทดสอบ 52.7 cm ² - อัตราป้อนน้ำเสียเข้าระบบคือ 300 ml./min
ตัวแปรอิสระ	- ขนาดรูพรุน (150 และ 300 kDa) - ความดันทรานส์เมมเบรน (0.5, 1, 1.5, 2 bars)
ตัวแปรตาม	ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ, ค่าความขุ่น, ค่าฟลักซ์, ค่าซีไอดี และความเข้มข้นของสารพีวีเอ

การทดลองที่ 2.2 นี้จะเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวและเก็บตัวอย่างน้ำหลังเดินระบบ ที่ช่วงเวลา 30 นาที 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองที่ 2.2

3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์และวิธีที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์	อ้างอิง
		ระดับ Bench scale	
ค่าพีเอช	pH meter	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method
ค่าความขุ่น	Turbidity meter	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method
ค่าซีโอดี	Closed reflux	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	Gravimetric method	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method
ความเข้มข้นสารพีวีเอ	Iodine method	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	Magdum, Minde และ Kalyanraman, (2013)
ความดัน	Pressure gauge	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method
อัตราการไหลน้ำเสีย	Flow meter	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method
ค่าฟลักซ์	Permeate volume per time	ช่วงเวลา 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ชั่วโมง	*Standard method

* Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1999

3.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังพักน้ำ
2. ปั๊มน้ำ
3. ข้อต่อ, ท่อน้ำ และวาล์วต่างๆ

4. เกจวัดความดัน
5. เครื่องวัดอัตราการไหล
6. เครื่องวัดค่าพีเอช
7. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
8. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ
9. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- 10.เทอร์โมมิเตอร์
- 11.ชุดกรวยกรองบุคเนอร์
- 12.ชุดเครื่องแก้ว



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาชนิด ปริมาณสารสร้างตะกอน และความเข้มข้นสารโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

4.1.1 น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

ในการทดลองศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl), อลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และ แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ ซึ่งคุณสมบัติของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ (Poly ethylene oxide) ที่ความเข้มข้น 0.05 และ 0.1 mg/L ต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

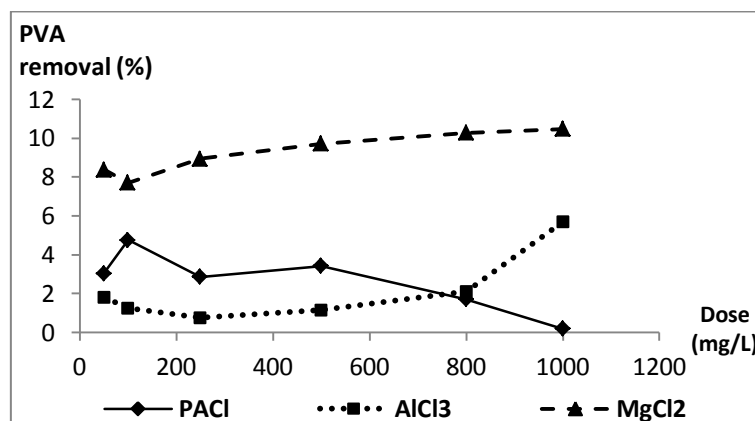
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่วัดได้
พีเอช	-	5.8
ความขุ่น	NTU	1.2
ปริมาณของแข็งละลายน้ำ	mg/L	4,950
ค่าซีโอดี	mg/L	20,775
ความเข้มข้นสารพีวีเอ	g/L	10.5

4.1.1.1 การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.05 mg/L

4.1.1.1.1 การศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม

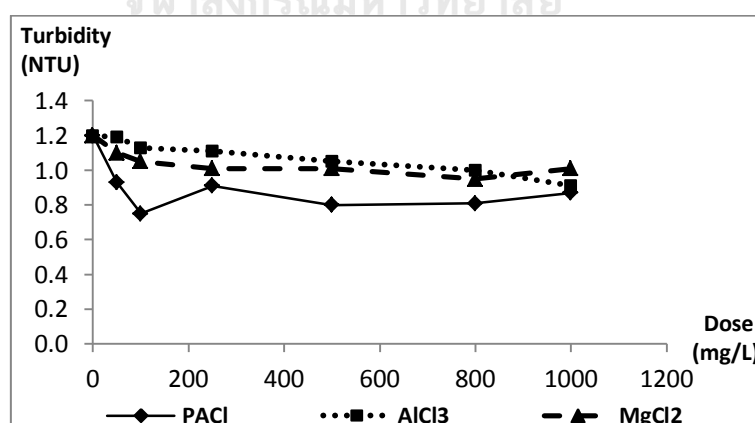
การทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด ต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน 50, 100, 250, 500, 800 และ 1,000 mg/L และมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าความขุ่น, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และ ค่าซีโอดี ที่มีผลต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์หลังการเติมสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด จากการทดลองพบว่าสำหรับสารสร้างตะกอน PACl, $AlCl_3$ และ $MgCl_2$ มีปริมาณความเข้มข้น

สารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุดเท่ากับ 100, 1,000 และ 1,000 mg/L ตามลำดับ โดยสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ สามารถกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 10.48% ส่วน PACl และ $AlCl_3$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอเท่ากับ 4.76% และ 5.71% ตามลำดับ (รูปที่ 4.1)

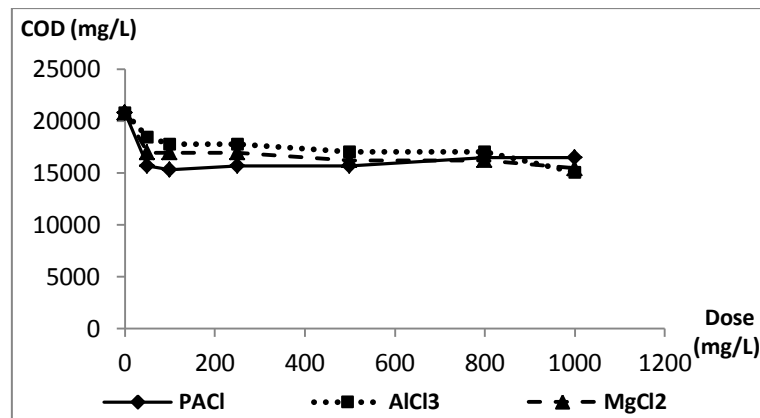


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน PACl, $AlCl_3$ และ $MgCl_2$ หลังการเติมสารสร้างตะกอนพบว่าสามารถกำจัดความขุ่นได้ลดลงเหลือ 0.75, 0.91 และ 1.01 NTU ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) สำหรับค่าซีไอเดมีค่าลดลงเหลือ 15,271 15,063 และ 15,450 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 4.3)

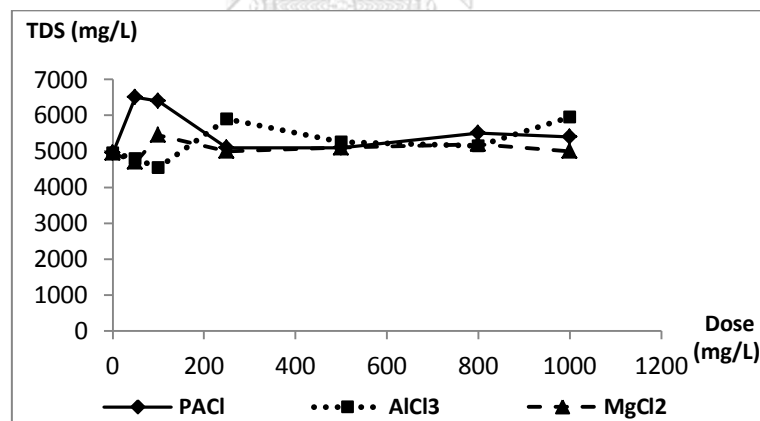


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่น กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

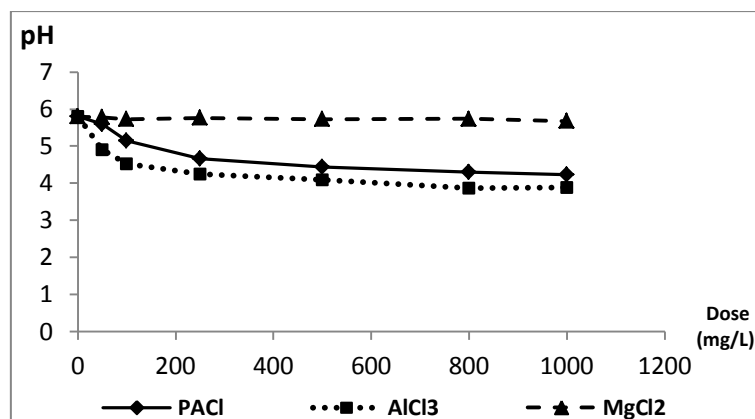


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

ในส่วนองปริมาณของแข็งละลายน้ำหลังการเติมสารสร้างตะกอนพบว่าค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6,400 5,950 และ 5,000 mg/L สำหรับสารสร้างตะกอน PACl, AlCl₃ และ MgCl₂ ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม (รูปที่ 4.4) กล่าวได้ว่าการเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำเสียจะส่งผลในการเพิ่มปริมาณของเกลือโลหะละลายน้ำมากขึ้น นอกจากนี้การเติมสารสร้างตะกอนในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าพีเอชลดลงสำหรับสารสร้างตะกอน PACl และ AlCl₃ สำหรับสารสร้างตะกอน MgCl₂ พบว่าค่าพีเอชลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.5)



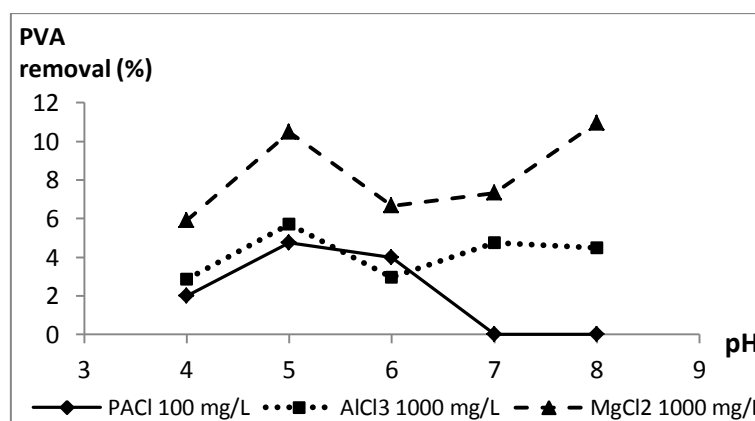
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

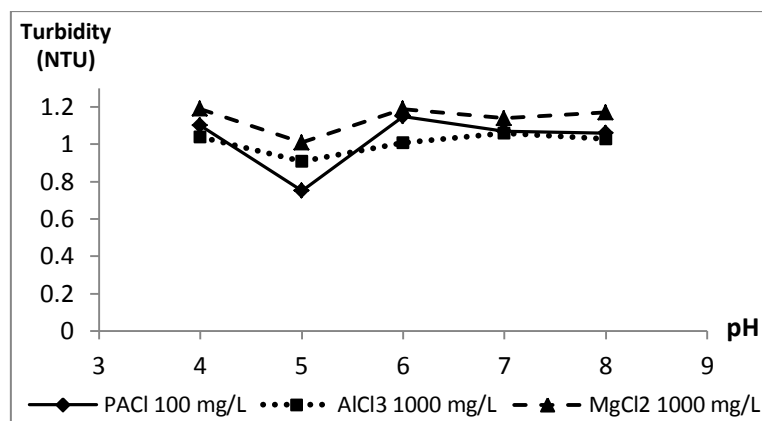
4.1.1.1.2 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์โดยศึกษาในช่วงค่าพีเอช 4-8 โดยเลือกศึกษาที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด และมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความขุ่น, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าซีโอดี ที่มีผลต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์หลังการเติมสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด จากการทดลองพบว่าสารสร้างตะกอน PACI และ AlCl₃ ที่ความเข้มข้น 100 และ 1,000 mg/L ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอเท่ากับ 4.76% และ 5.71% ตามลำดับ ส่วน MgCl₂ ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 และมีอัตราการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอเท่ากับ 10.95% (รูปที่ 4.6)

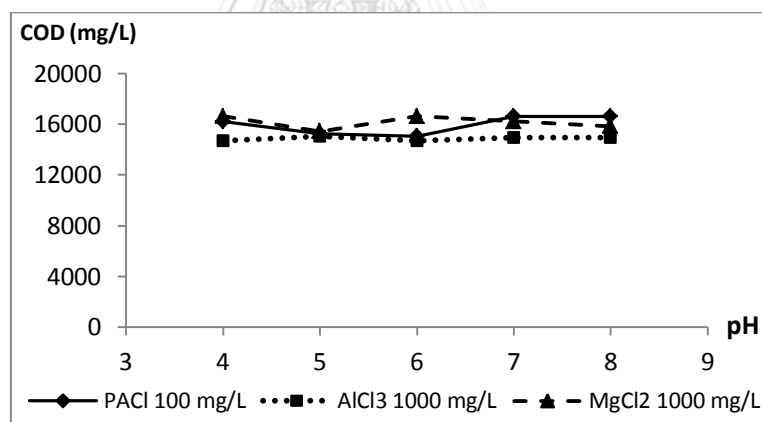


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับค่าพีเอช

นอกจากนี้ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน PACl, $AlCl_3$ และ $MgCl_2$ หลังการเติมสารสร้างตะกอนพบว่าสามารถกำจัดความขุ่นได้ลดลงเหลือ 0.75, 0.91 และ 1.17 NTU ตามลำดับ (รูปที่ 4.7) สำหรับค่าซีไอดีมีค่าลดลงเหลือ 15,271 15,063 และ 15,844 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 4.8)

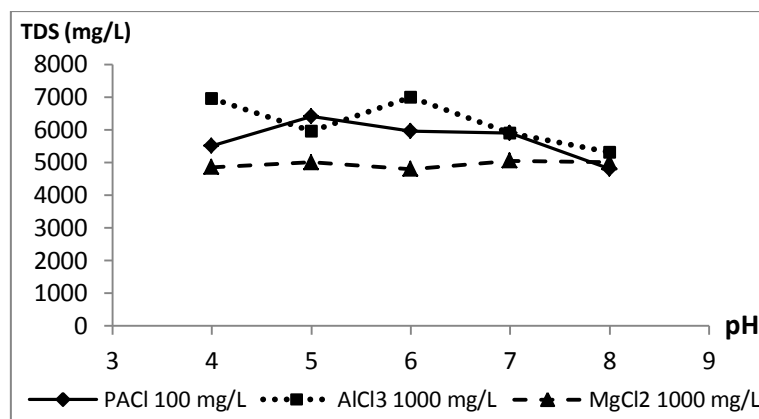


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับค่าพีเอช



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับค่าพีเอช

ในส่วนของปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6,400 5,950 และ 5,000 mg/L สำหรับสารสร้างตะกอน PACl และ $AlCl_3$ และ $MgCl_2$ กล่าวได้ว่าการเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำเสียจะส่งผลในการเพิ่มปริมาณของเกลือโลหะละลายน้ำมากขึ้น (รูปที่ 4.9)

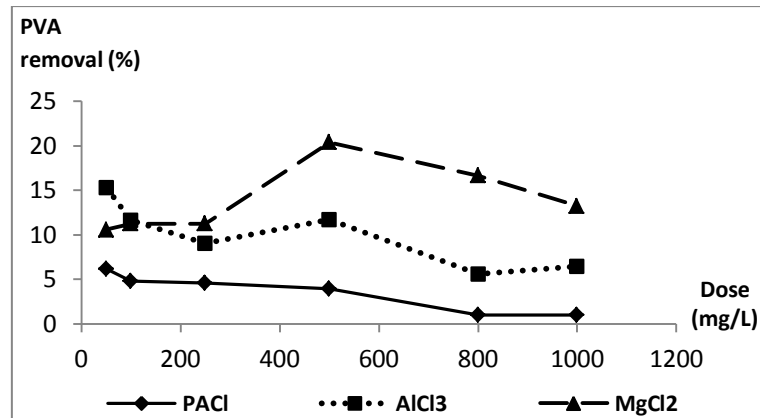


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับค่าพีเอช

4.1.1.2 การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/L

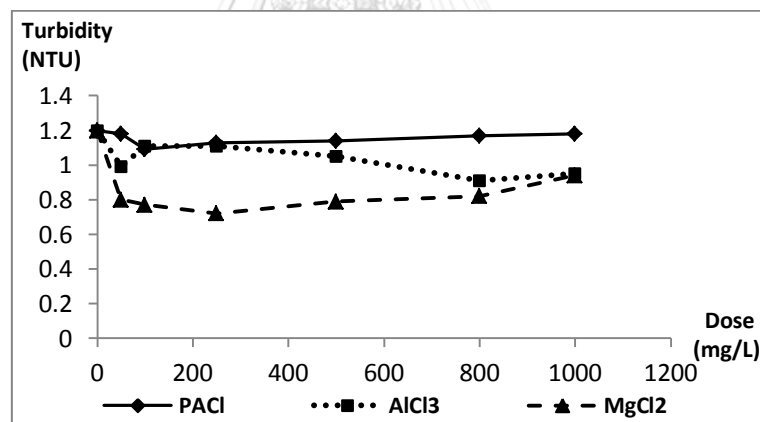
4.1.1.2.1 การศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม

การทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด ต่อการกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน 50, 100, 250, 500, 800 และ 1,000 mg/L และมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าความขุ่น, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และ ค่าซีไอดี ที่มีผลต่อน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์หลังการเติมสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด จากการทดลองพบว่าสำหรับสารสร้างตะกอน PACl, AlCl₃ และ MgCl₂ มีปริมาณความเข้มข้นสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์มากที่สุดเท่ากับ 50, 50 และ 500 mg/L ตามลำดับ โดยสารสร้างตะกอน MgCl₂ สามารถกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์มากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิเวอเท่ากับ 20.38% ส่วน PACl และ AlCl₃ ความเข้มข้นสารฟิเวอลดลงเหลือ 6.19% และ 15.33% ตามลำดับ (รูปที่ 4.10)

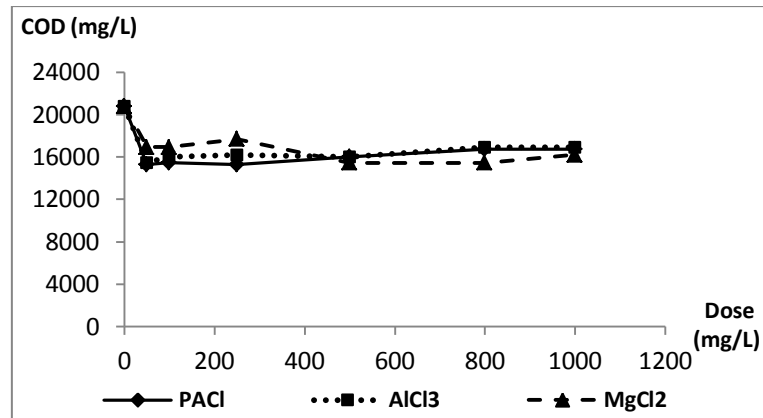


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน PACl, AlCl₃ และ MgCl₂ หลังการเติมสารสร้างตะกอนพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ลดลงเหลือ 1.18, 0.99 และ 0.79 NTU ตามลำดับ (รูปที่ 4.11) สำหรับค่าซีไอดีมีค่าลดลงเหลือ 15,271 15,450 และ 15450 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 4.12)

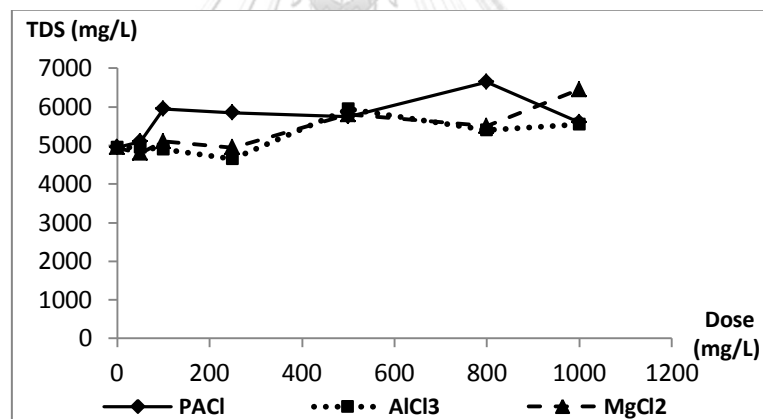


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ความขุ่น กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

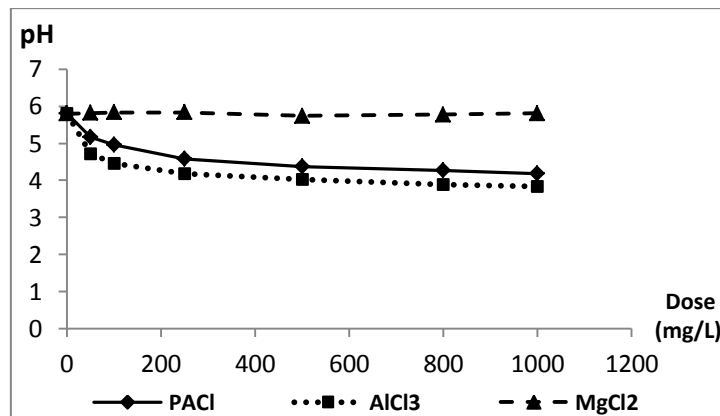


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

ในส่วนองปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่ามีความเข้มข้นเท่ากับ 5,100 4,950 และ 5,800 mg/L ตามลำดับ กล่าวได้ว่าการเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำเสียจะส่งผลในการเพิ่มปริมาณของเกลือโลหะละลายน้ำมากขึ้น (รูปที่ 4.13) นอกจากนี้การเติมสารสร้างตะกอนในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าพีเอชลดลงสำหรับสารสร้างตะกอน PACl และ AlCl₃ (รูปที่ 4.14)



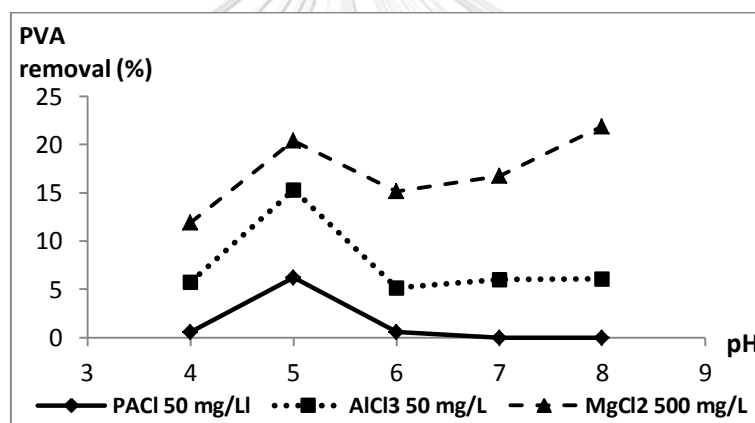
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน

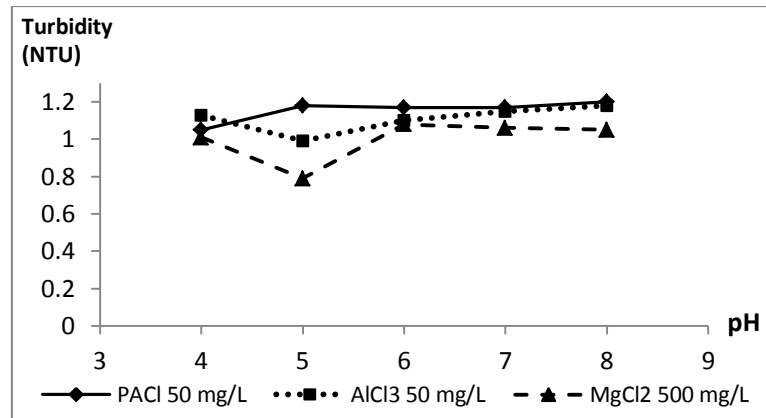
4.1.1.2.2 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์โดยศึกษาในช่วงค่าพีเอช 4-8 โดยเลือกศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด และมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความขุ่น, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าซีโอดี ที่มีผลต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์หลังการเติมสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด จากการทดลองพบว่าสารสร้างตะกอน PACl และ $AlCl_3$ ที่ความเข้มข้น 50 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยกำจัดสารพีวีเอเท่ากับ 6.19% และ 15.33% ตามลำดับ ส่วน $MgCl_2$ ที่ความเข้มข้น 500 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 และมีอัตราการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 21.90% (รูปที่ 4.15)

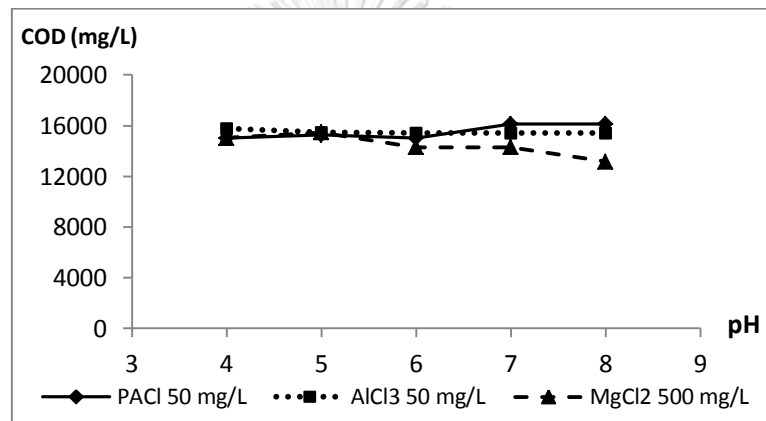


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับค่าพีเอช

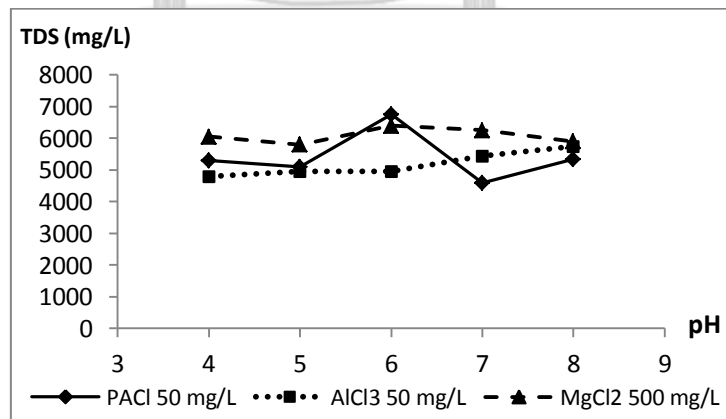
นอกจากนี้ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน PACl, $AlCl_3$ และ $MgCl_2$ หลังการเติมสารสร้างตะกอนพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ลดลงเหลือ 1.18, 0.99 และ 1.05 NTU ตามลำดับ (รูปที่ 4.16) สำหรับค่าซีโอดีมีค่าลดลงเหลือ 15,271 15,450 และ 13,173 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 4.17) ในส่วนของปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5,100 4,950 และ 5,900 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับค่าพีเอช

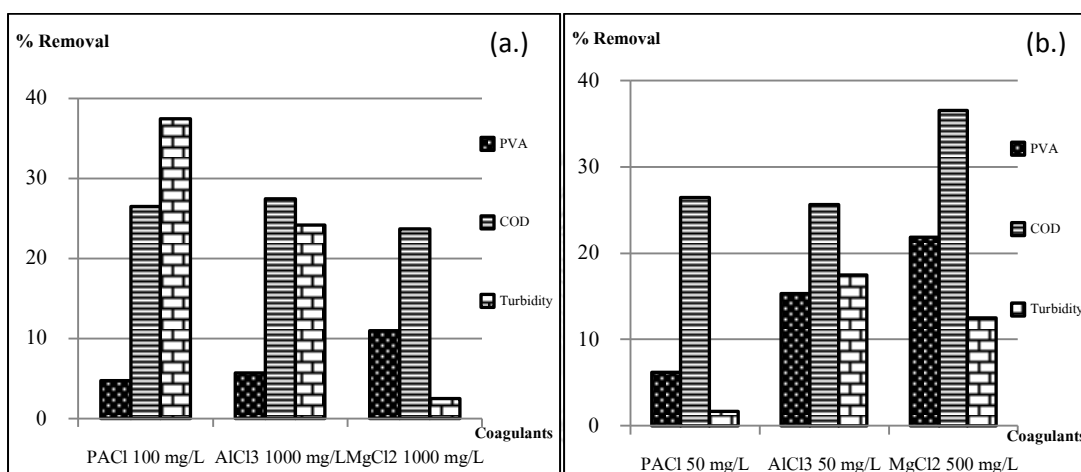


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับค่าพีเอช



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับค่าพีเอช

จากการทดลองพบว่าการเติมสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุในปริมาณที่มากขึ้น (0.1 mg/L) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารพีวีเอในน้ำเสีย รวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี และความขุ่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19 ในส่วนของปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหลังการเติมสารสร้างตะกอน กล่าวได้ว่าการเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำเสียจะส่งผลในการเพิ่มปริมาณของเกลือโลหะละลายน้ำมากขึ้น



รูปที่ 4.19 ผลของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ 0.05 mg/L (a.) และ 0.1 mg/L (b.) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่มีผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมพบว่า MgCl₂ เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ของการกำจัดสารพีวีเอที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 ส่วน PACl และ AlCl₃ มีประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 กล่าวได้ว่ากลไกของการกำจัดสารพีวีเอด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดเป็นการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ของสารสร้างตะกอนและกลไกการดูดติดผิวด้วยโลหะประจุบวกจากสารสร้างตะกอนที่เติมลงไป (พรศักดิ์ สมรโกรสรกิจ, 2553) ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอะตอมแมกนีเซียมมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอะตอมของอลูมิเนียม ทำให้แมกนีเซียมมีพื้นที่การดูดติดที่ผิวของคอลลอยด์มากกว่า จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอมากกว่าสารสร้างตะกอนกลุ่มอลูมิเนียม

4.1.2 น้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (Desizing wastewater)

ในการทดลองศึกษาชนิด ปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1.1 พบว่า $MgCl_2$ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือก $MgCl_2$ เป็นสารสร้างตะกอนที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นและสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง โดยน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.2 โดยจะศึกษาผลของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ (Poly ethylene oxide) ที่ความเข้มข้น 0.05 และ 0.1 mg/L โดยจะศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดสารพีวีเอและค่าความขุ่นในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง ดังนี้

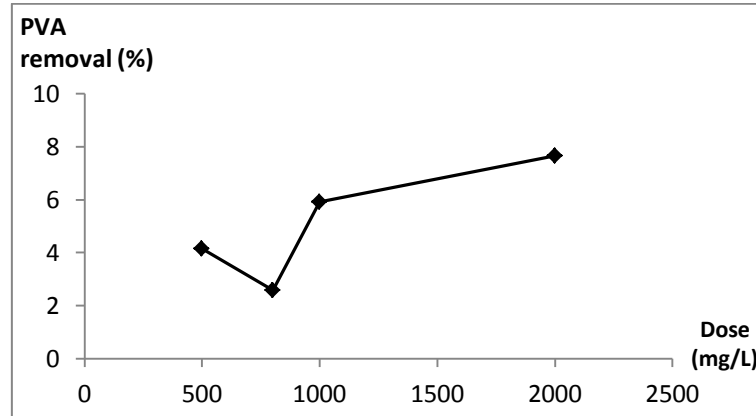
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่วัดได้
พีเอช	-	5.95
ความขุ่น	NTU	858
ปริมาณของแข็งละลายน้ำ	mg/L	12,800
ค่าซีไอดี	mg/L	58,879
ความเข้มข้นสารพีวีเอ	g/L	12

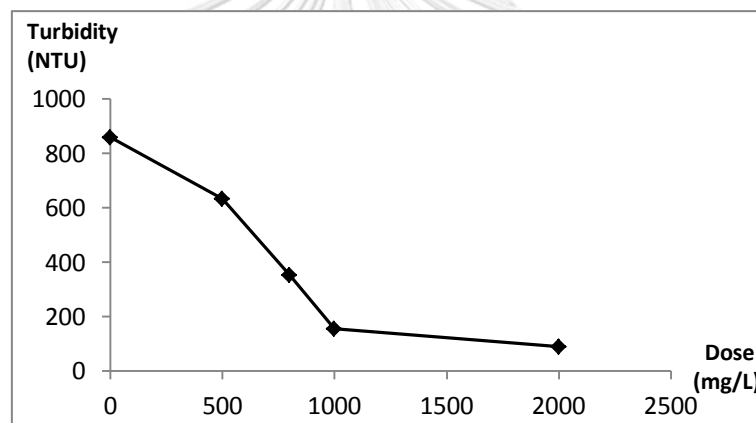
4.1.2.1 การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.05 mg/L

การทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ ที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารพีวีเอและความขุ่นในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง จากการทดลองที่ 4.1.1.1 พบว่าความเข้มข้นที่กำจัดสารพีวีเอได้มากที่สุดคือ 1,000 mg/L ดังนั้นการทดลองนี้จะเลือกความเข้มข้นอีก 3 ค่า ได้แก่ 500, 800 และ 2,000 mg/L และมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าซีไอดี ที่มีผลต่อน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์หลังการเติมสารสร้างตะกอน จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 2,000 mg/L สามารถกำจัดสารพีวีเอ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 7.67% (รูปที่ 4.20) และความขุ่นลดลงเหลือ 90 NTU (รูปที่ 4.21) นอกจากนี้พบว่าค่าซีไอดีมีค่าลดลงเหลือ 55,852 mg/L (รูปที่ 4.22) ส่วนปริมาณของแข็งละลายน้ำที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13,500 mg/L (รูปที่ 4.23) สำหรับค่าพีเอชหลังเติมสารสร้างตะกอนมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.24) จากการทดลองกล่าวได้ว่าการเติมสารสร้างตะกอนในปริมาณมากขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพใน

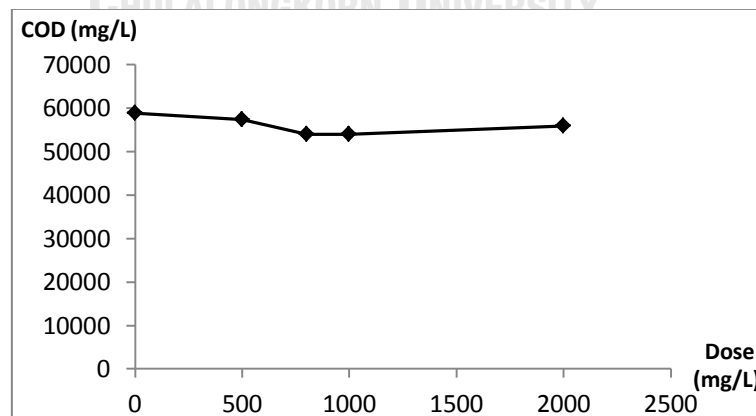
การกำจัดสารพีวีเอและค่าความขุ่น แต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอลดลง และทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำมากขึ้นเนื่องจากสารเคมีที่เติมลงไปมีปริมาณมาก



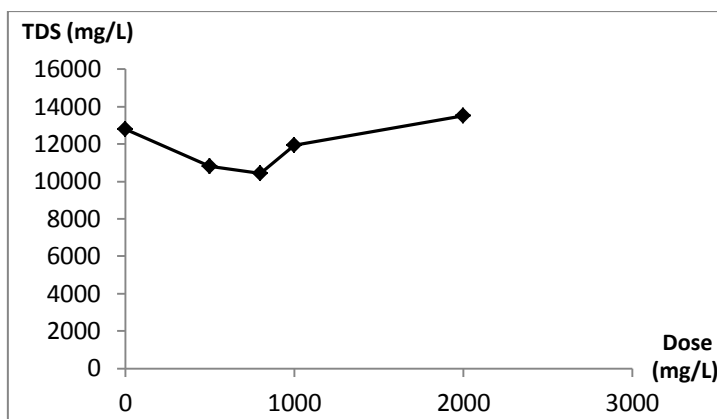
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



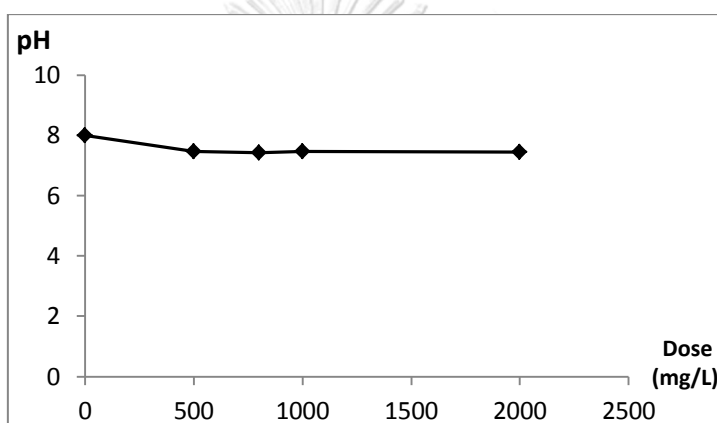
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน

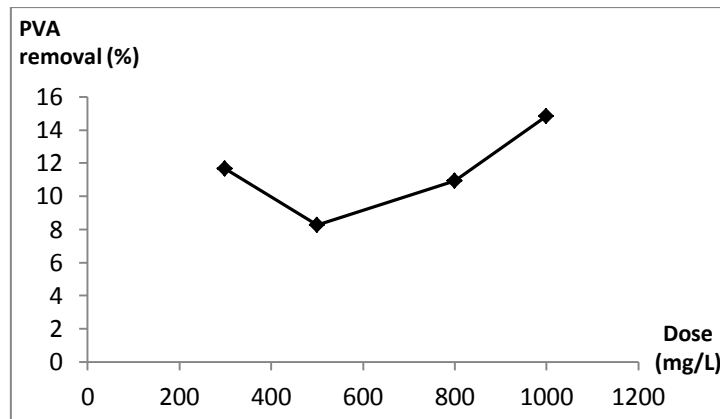


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน

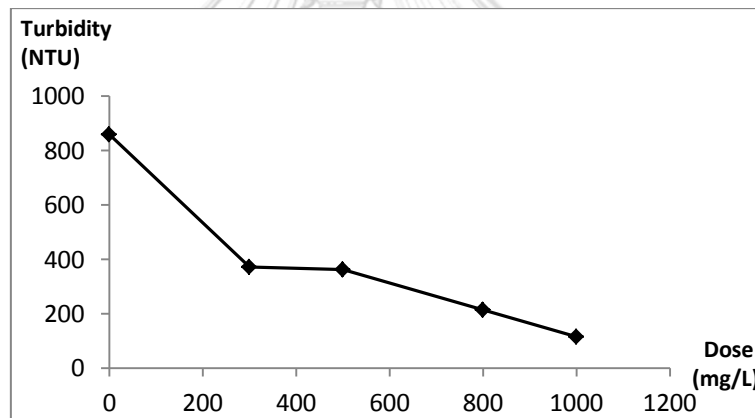
4.1.2.2 การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/L

การทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ ที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารฟิวีเอและความขุ่นในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง จากการทดลองที่ 4.1.1.2 พบว่าความเข้มข้นที่กำจัดสารฟิวีเอได้มากที่สุดคือ 500 mg/L ดังนั้นการทดลองนี้จะเลือกความเข้มข้นอีก 3 ค่า ได้แก่ 300, 800 และ 1,000 mg/L และมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และ ค่าซีโอดี ที่มีผลต่อน้ำเสียฟิวีเอสังเคราะห์หลังการเติมสารสร้างตะกอน จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L สามารถกำจัดสารฟิวีเอ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 14.83% (รูปที่ 4.25) และสามารถกำจัดความขุ่นลดลงเหลือ 115 NTU (รูปที่ 4.26) นอกจากนี้พบว่าค่าซีโอดี มีค่าลดลงเหลือ 53,581 mg/L (รูปที่ 4.27) ส่วนปริมาณของแข็งละลายน้ำที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13,500 mg/L (รูปที่ 4.28) สำหรับค่าพีเอชหลังเติมสารสร้างตะกอนมีค่า

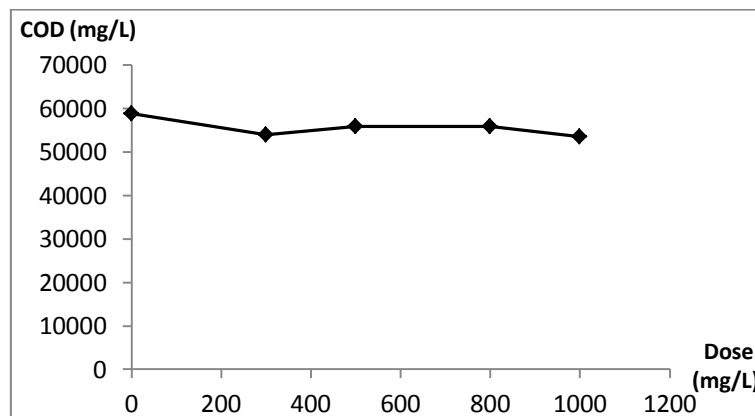
ลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.29) จากการทดลองกล่าวได้ว่าการเติมสารสร้างตะกอนในปริมาณมากขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิวเอและค่าความขุ่น แต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีลดลง และทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำมากขึ้นเนื่องจากสารเคมีที่เติมลงไปปริมาณมาก



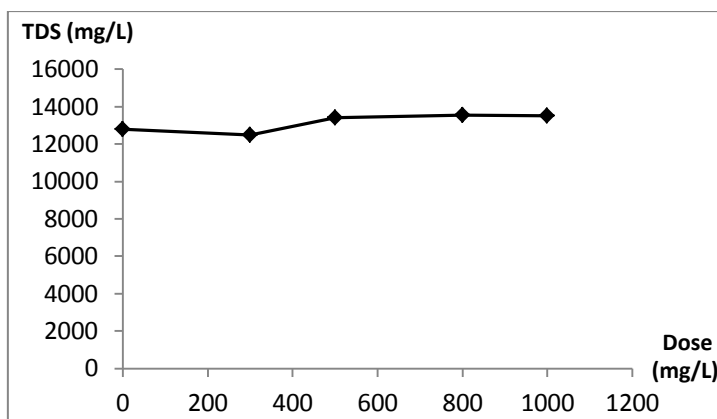
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารฟิวเอ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



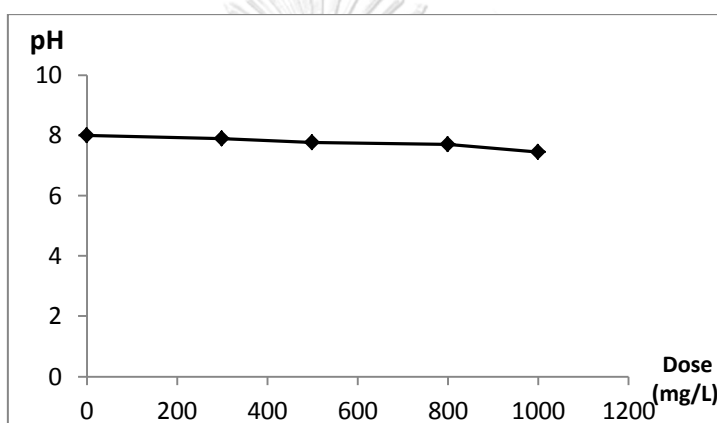
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดี กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



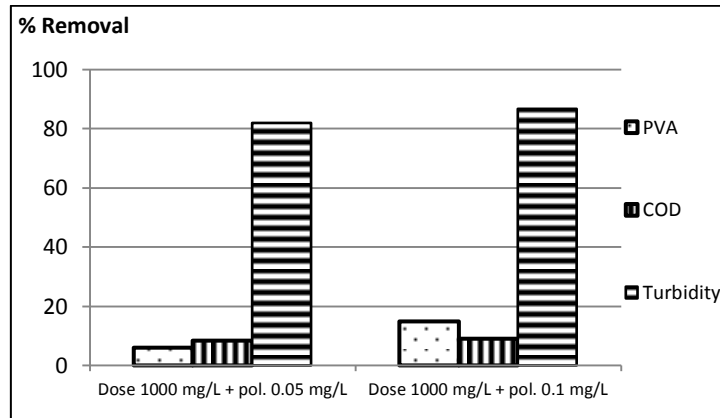
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งละลายน้ำ กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน



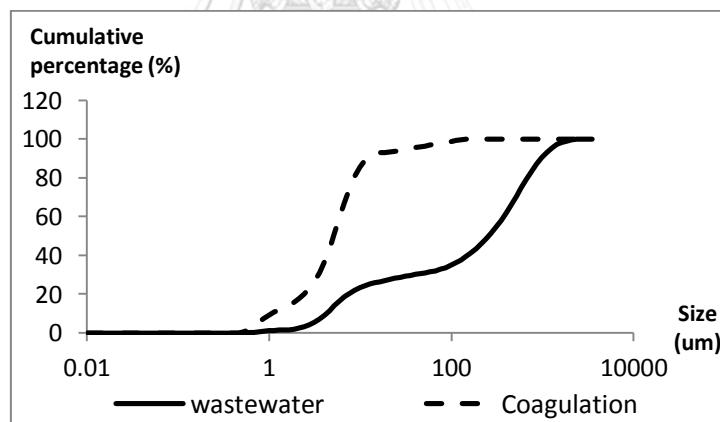
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับความเข้มข้นสารสร้างตะกอน

จากการทดลองพบว่าการเติมสารโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้นมากขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงค่าพารามิเตอร์อื่นๆในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (รูปที่ 4.30) โดยที่ความเข้มข้นสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ 1,000 mg/L ร่วมกับความเข้มข้นสารโพลีเมอร์ 0.1 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุดเท่ากับ 14.83% และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น และค่าซีไอดีเท่ากับ 86.60% และ 8.99% ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณของแข็งละลายน้ำ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนักเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ยกเว้นการกำจัดความขุ่น ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 80% กล่าวได้ว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถกำจัดสารแขวนลอย หรือ คอลลอยด์ที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ (รูปที่ 4.31) ส่งผลให้กระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูง แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งละลายน้ำ ค่าซีไอดี รวมไปถึง

ปริมาณสารพีวีเอน้อย เนื่องจากในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งอาจมีสารพีวีเอและสารชนิดอื่นเป็นองค์ประกอบ โดยสารเหล่านั้นอาจมีอนุภาคขนาดเล็กจนไม่สามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน



รูปที่ 4.30 ผลของสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งของสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความถี่สะสม กับขนาดอนุภาคก่อน และหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน

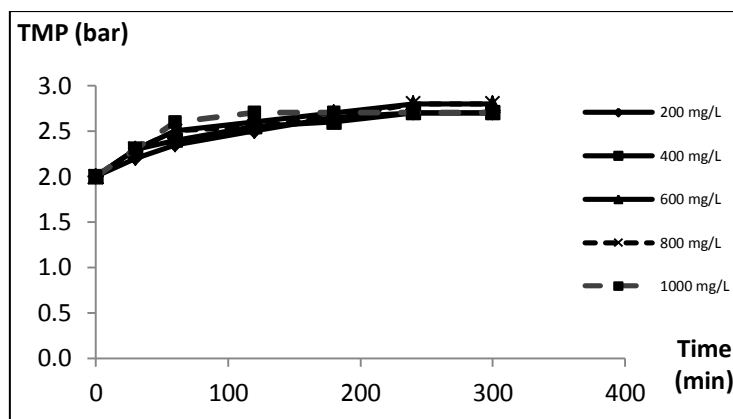
4.2 ผลการศึกษาการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ในการทดลองนี้ศึกษาความดันและขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในระดับชุดทดสอบ (Bench scale) ต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง โดยมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ, ค่าซีไอดี, ความเข้มข้นสารพีวีเอ, ค่าความขุ่น, ความดันทรานส์เมมเบรน และค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน ทั้งก่อนและหลังการกรอง โดยผลการทดลองมีดังนี้

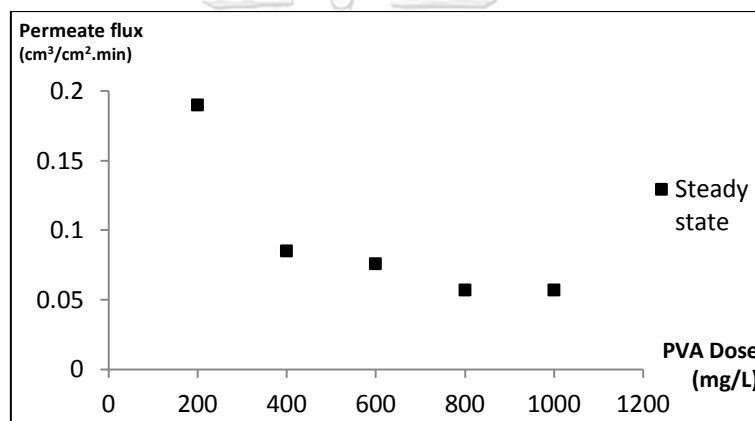
4.2.1 น้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

ในการทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 200, 400, 600, 800, 1,000 mg/L ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในชุดทดลองขนาดทดสอบ (Bench scale) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์แต่ละความเข้มข้นสามารถดูได้ในภาคผนวก โดยจะศึกษาผลของความดันและขนาดรูพรุนที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน และศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในแง่ของการกำจัดสารพีวีเอได้ ประสิทธิภาพมากที่สุด โดยกำหนดขนาดรูพรุนเริ่มต้นที่ 300 KDa และความดันที่ 2 bar ระยะเวลาในการเดินระบบจะเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่โดยศึกษาจากค่าความดันมีค่าคงที่ ผลการทดลองมีดังนี้

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ในแต่ละความเข้มข้นต่อการกำจัดสารพีวีเอด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา 300 นาที (รูปที่ 4.32) โดยที่สภาวะคงที่ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนในแต่ละความเข้มข้นมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น (รูปที่ 4.33) กล่าวได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นอัตราการสะสมของสารพีวีเอในรูพรุนของเมมเบรนจะมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่มีค่าน้อยลงเมื่อความเข้มข้นน้ำเสียมากขึ้น



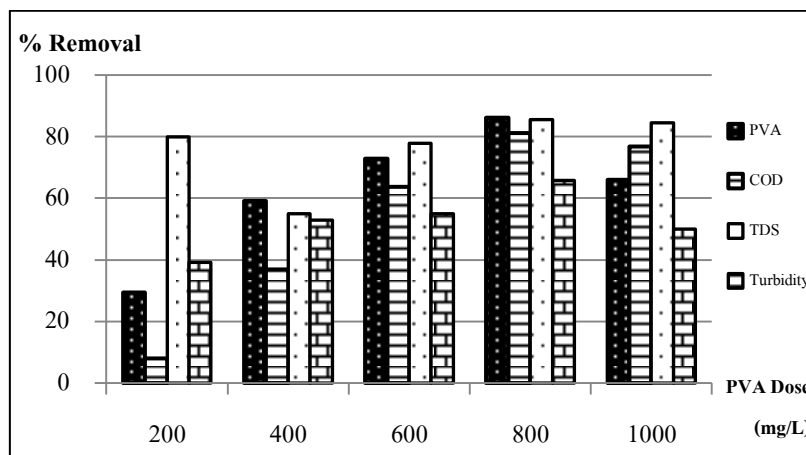
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับระยะเวลาในการเดินระบบ UF ที่ความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่างๆ



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่ กับความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าซีไอดี, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันแสดงดังรูปที่ 4.34 จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 800 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุด ที่ความดัน 2 bar และขนาดรูพรุนเมมเบรน 300 kDa คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 86.13% และมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าซีไอดีเท่ากับ 65.79%, 85.59% และ 81.24% ตามลำดับ ดังนั้นที่ความเข้มข้น 800 mg/L จึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการศึกษา

ผลของความดัน ทรานส์เมมเบรนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในชุดทดสอบ

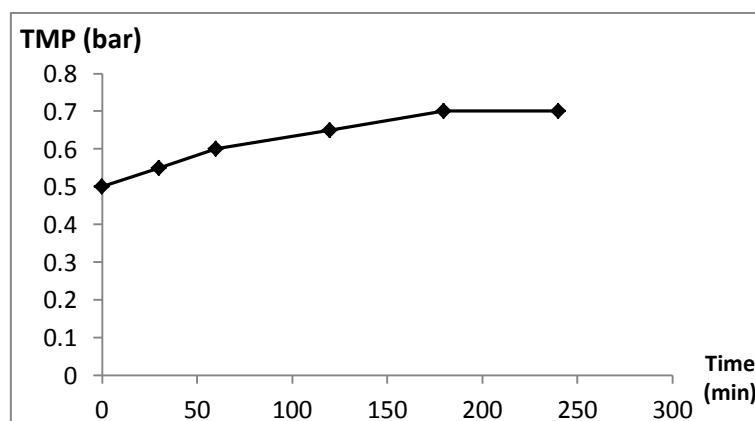


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับความเข้มข้นของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

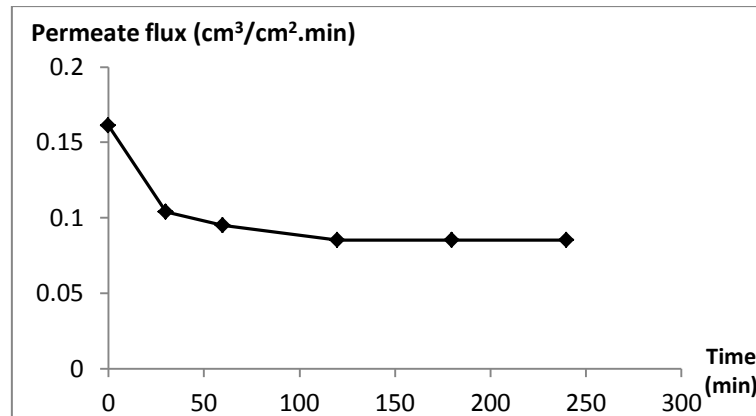
4.2.1.1 ผลของความดันทรานส์เมมเบรน

- ความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar

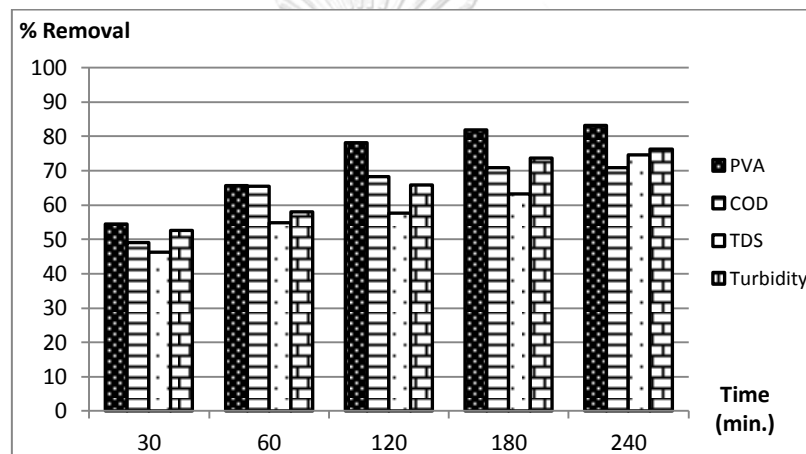
การศึกษาความดันทรานส์เมมเบรนที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์เข้มข้น 800 mg/L ในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 300 kDa พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 240 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 0.7 bar (รูปที่ 4.35) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.161 เหลือ 0.085 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.36)



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

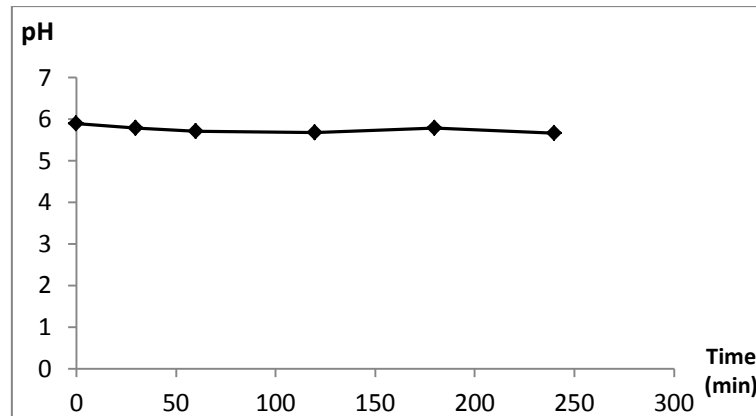


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

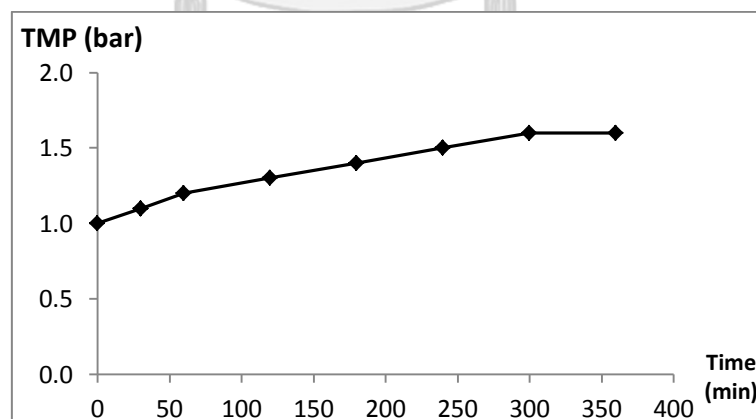
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 83.12%, 70.92%, 74.58% และ 76.32% (รูปที่ 4.37) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.38)



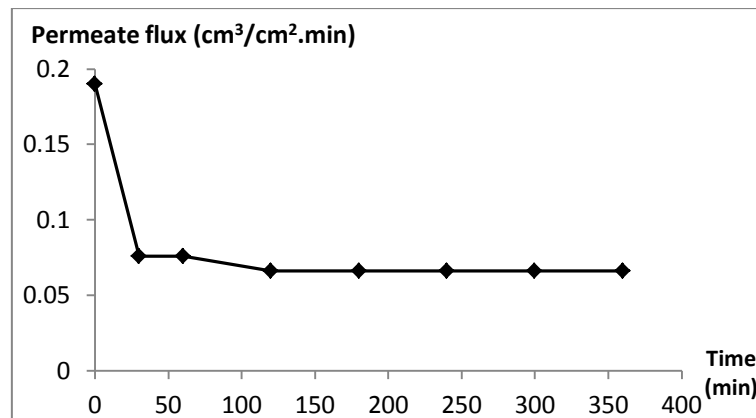
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar

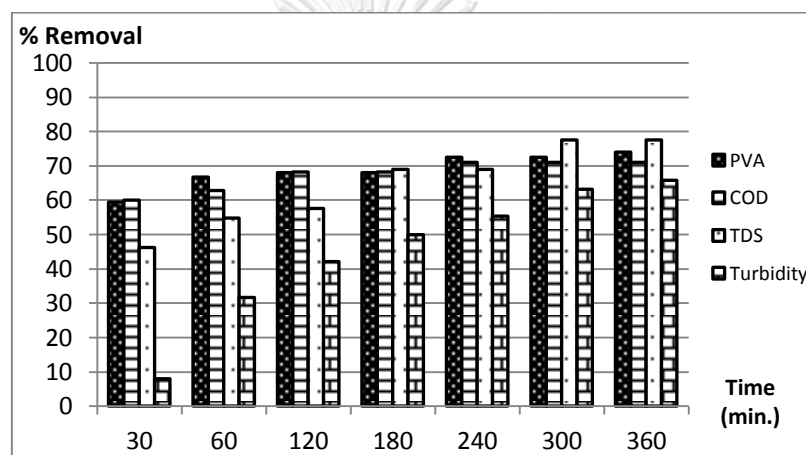
การศึกษาความดันทรานส์เมมเบรนที่เหมาะสมต่อการกำจัดสาร พีวีเอในน้ำเสีย พีวีเอสังเคราะห์เข้มข้น 800 mg/L ในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 300 kDa พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 360 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 1.6 bar (รูปที่ 4.39) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.19 เหลือ 0.066 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.40)



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

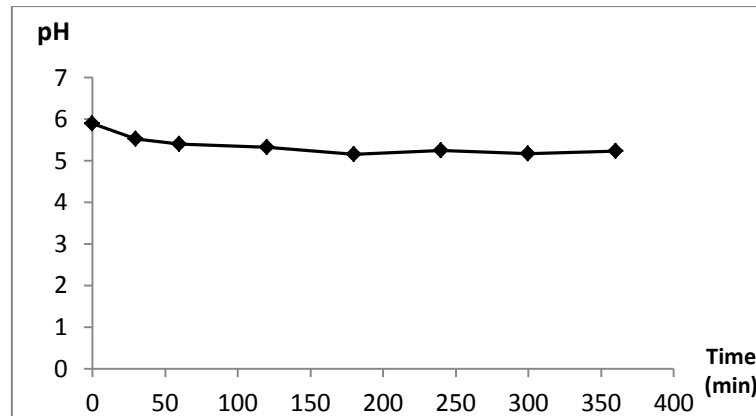


รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

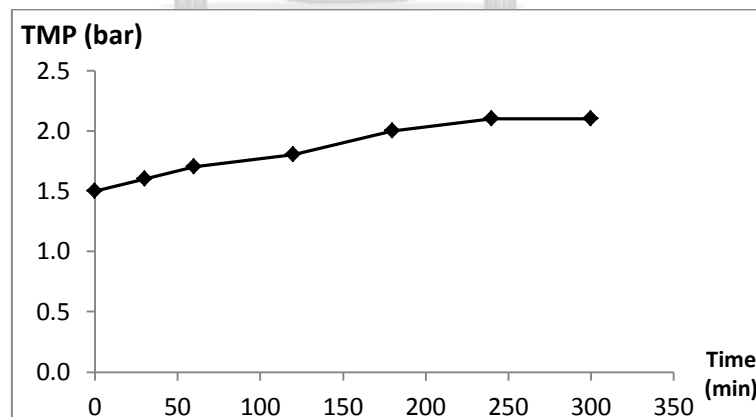
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 74%, 70.92%, 77.46% และ 65.79% (รูปที่ 4.41) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.42)



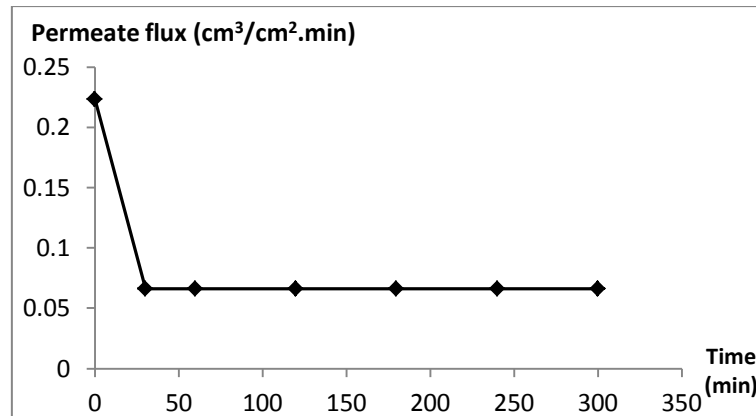
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar

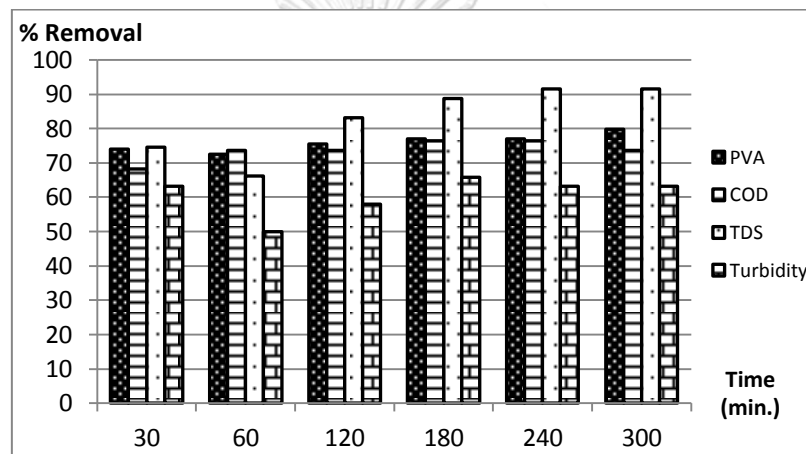
การศึกษาความดันทรานส์เมมเบรนที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสีย พีวีเอสังเคราะห์เข้มข้น 800 mg/L ในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 300 kDa พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 300 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 2.1 bar (รูปที่ 4.43) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มต้นระบบ 0.223 เหลือ 0.066 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.44)



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

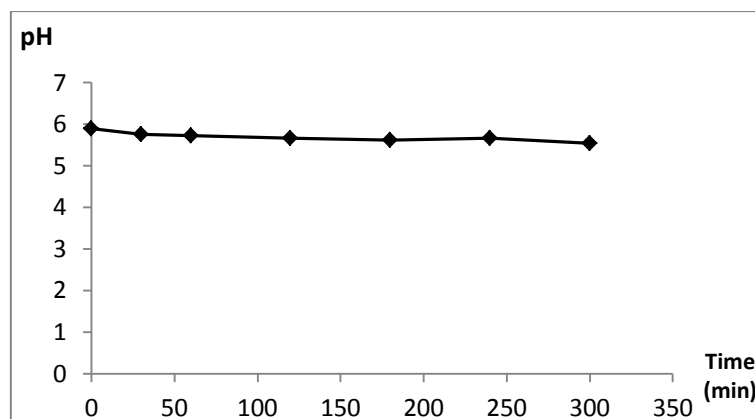


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



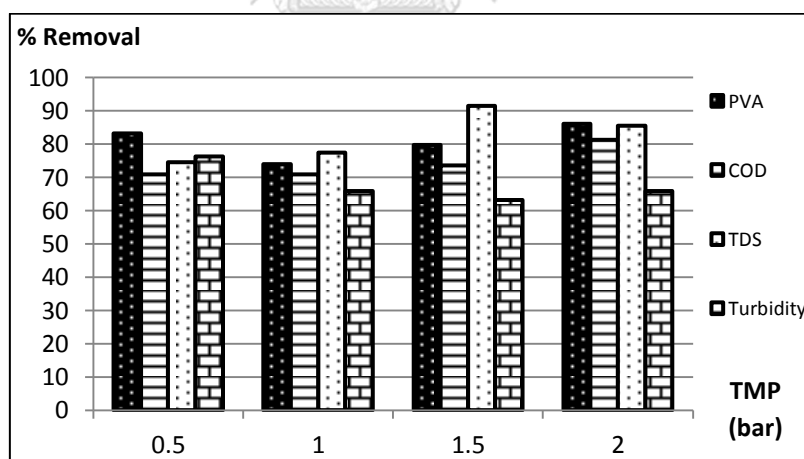
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar ที่สภาวะคงที่ เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 79.75%, 73.64%, 91.53% และ 63.16% (รูปที่ 4.45) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.46)



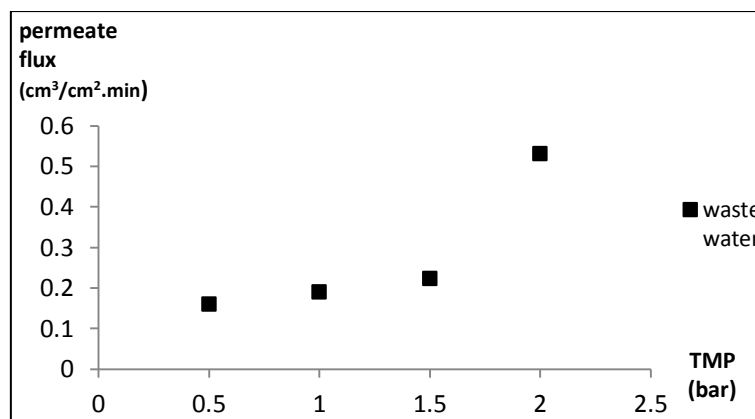
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

จากการศึกษาผลของความดันทรานส์เมมเบรนพบว่าที่ความดันเท่ากับ 2 bar มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด (รูปที่ 4.47) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ S.H. Lin และ Lan (1995) ที่กล่าวว่าความดันที่เหมาะสมในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนเพื่อนำสารพีวีเอกลับมาใช้ใหม่คือที่ความดันเท่ากับ 2 bar นอกจากนี้ เมื่อความดันทรานส์เมมเบรนเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น (ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน, 2551) (รูปที่ 4.48)



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับค่าความดันทรานส์เมมเบรน

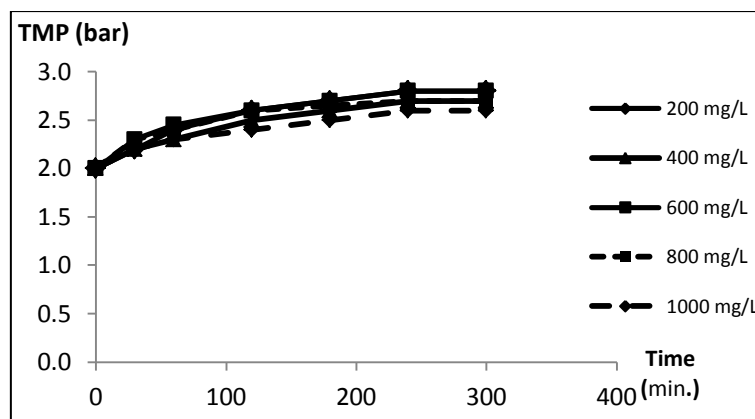


รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรน กับค่าความดันทรานส์เมมเบรน

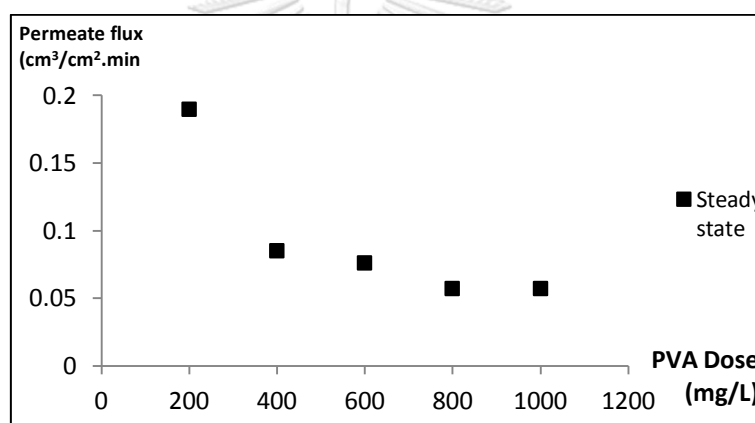
4.2.1.2 การใช้เมมเบรนขนาดรูพรุน 150 kDa สำหรับกำจัดสารพีวีเอ

จากการทดลองที่ 4.2.1.1 พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรนเท่ากับ 2 bar มีค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่เวลาเริ่มต้นและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด ดังนั้นในการทดลองนี้ใช้เมมเบรนขนาดรูพรุน 150 kDa ที่ความดันทรานส์เมมเบรนเท่ากับ 2 bar ต่อการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 200, 400, 600, 800 และ 1,000 mg/L เพื่อศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในแง่ของการกำจัดสารพีวีเอมากที่สุด ผลการทดลองมีดังนี้

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ในแต่ละความเข้มข้นต่อการกำจัดสารพีวีเอด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา 300 นาที (รูปที่ 4.49) โดยที่สภาวะคงที่ ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนในแต่ละความเข้มข้นมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น (รูปที่ 4.50) กล่าวได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นอัตราการสะสมของสารพีวีเอในรูพรุนของเมมเบรนจะมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่มีค่าน้อยลงเมื่อความเข้มข้นน้ำเสียมากขึ้น



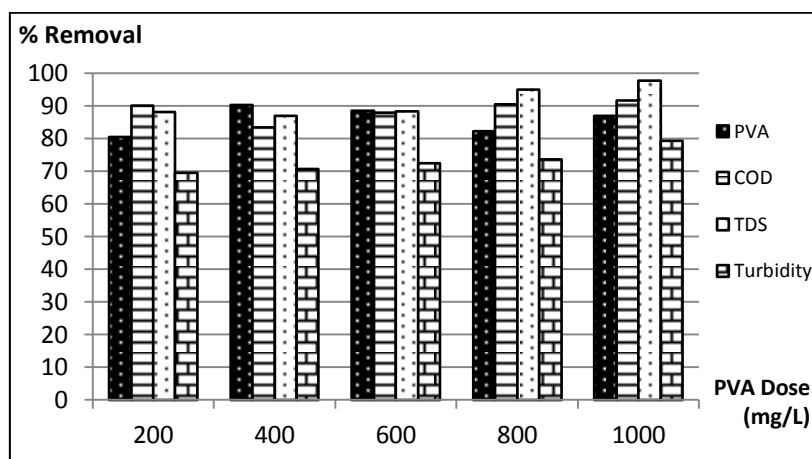
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับระยะเวลาในการเดินระบบ UF ที่ความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่างๆ



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนที่สภาวะคงที่ กับความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าซีไอดี, ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันแสดงดังรูปที่ 4.51 จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 400 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์มากที่สุด ที่ความดัน 2 bar และขนาดรูพรุนเมมเบรน 150 kDa คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 90.25 และมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดค่าความขุ่น ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าซีไอดีเท่ากับ 70.59, 86.89 และ 83.44 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการทดลองขนาดรูพรุนที่ 150 กับ 300 kDa ในทุกความเข้มข้นที่ศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอที่ขนาดรูพรุน 150 kDa มีมากกว่าขนาด 300 kDa กล่าวได้ว่าขนาด

ของสารพีวีเอมีขนาดเล็กกว่า 150 kDa หรือประมาณ 140 kDa (Choo, Choi และ Hwang, 2007) ทำให้มีสารพีวีเอบางส่วนหลุดผ่านเมมเบรนออกไปได้



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับความเข้มข้นของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

4.2.2 น้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

ในการทดลองนี้เริ่มต้นจากการเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง เพื่อกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อลดการอุดตันในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยชนิด ปริมาณสารสร้างตะกอนและความเข้มข้นสารโพลีเมอร์เลือกจากการทดลองที่ 4.1.2 คือ $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1,000 mg/L และสารโพลีเมอร์ที่มีความเข้มข้น 0.1 mg/L นอกจากนี้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้เลือกใช้ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 เนื่องจากที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 เมื่อเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดการตกตะกอนได้ชั้นน้ำใสในปริมาณน้อยทำให้นำมาศึกษาต่อในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้ยากจึงเลือกที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 ซึ่งมีชั้นน้ำใสในปริมาณที่มากกว่า เมื่อทำกระบวนการโคแอกกูเลชันจะได้ส่วนน้ำใสเพื่อนำมาศึกษาในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนต่อไป โดยตารางที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งทั้งก่อนและหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติ น้ำเสีย กระบวนการลอกแป้งก่อนและหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน

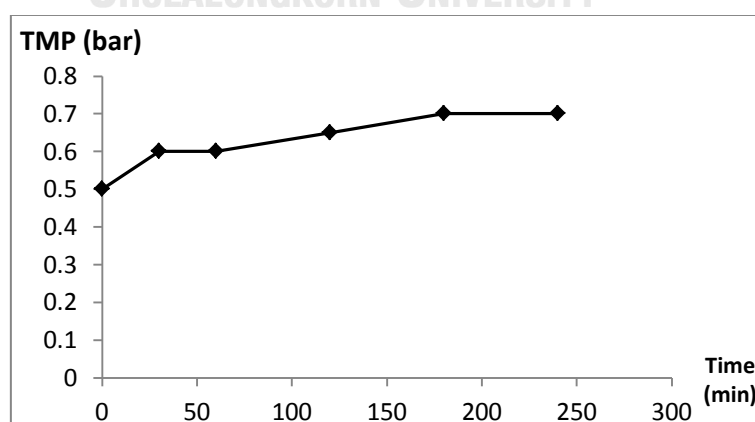
พารามิเตอร์	หน่วย	ก่อน โคแอกกูเลชัน	หลัง โคแอกกูเลชัน
พีเอช	-	5.7	9.98
ความขุ่น	NTU	800	120
ปริมาณของแข็งละลายน้ำ	mg/L	4,500	7,967
ค่าซีโอดี	mg/L	10,032	7,882
ความเข้มข้นสารฟิวเอ	g/L	4.2	3.4

การทดลองอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนจะศึกษาผลของขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนต่อการกำจัดสารฟิวเอ 2 ขนาดคือ 150 และ 300 kDa โดยในแต่ละขนาดรูพรุนจะมีการศึกษาผลของความดันทรานส์เมมเบรนที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 bar เพื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิวเอรวมไปถึงประสิทธิภาพในการเดินระบบ ผลการทดลองมีดังนี้

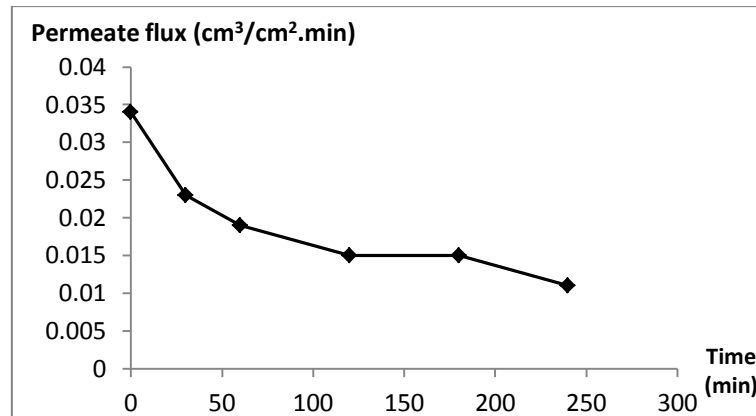
4.2.2.1 ขนาดรูพรุน 150 kDa

- ความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar

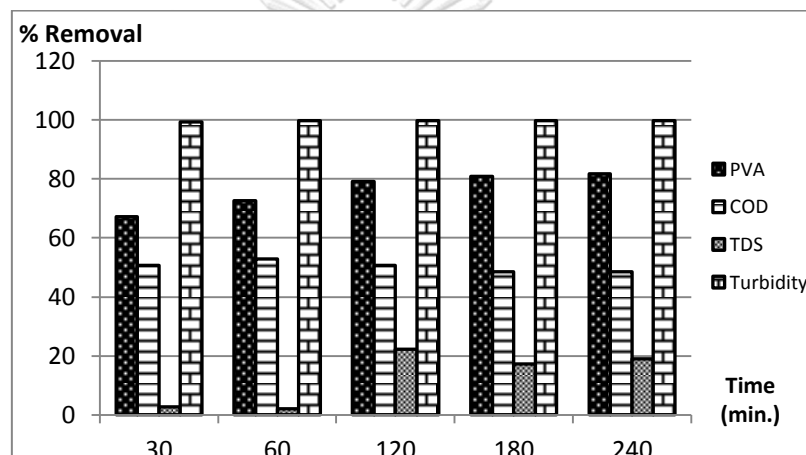
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 240 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 0.7 bar (รูปที่ 4.52) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.034 เหลือ 0.011 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.53)



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

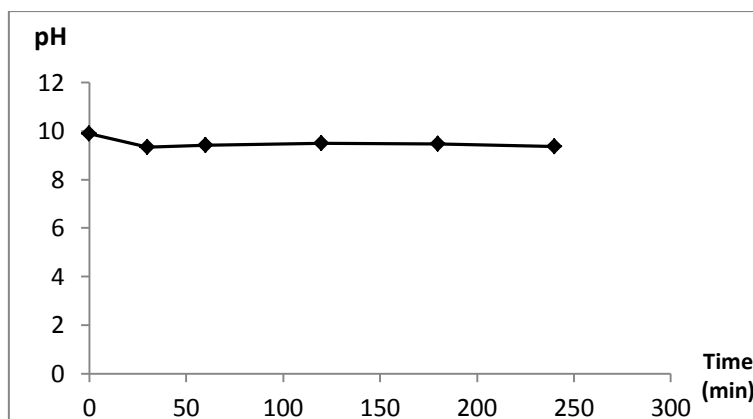


รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

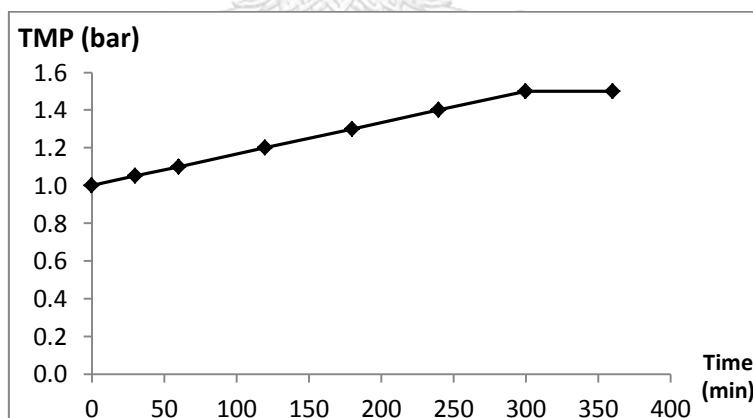
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar ขนาดรูพรุน 150 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 81.76%, 48.53%, 19.04% และ 99.71% (รูปที่ 4.54) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.55)



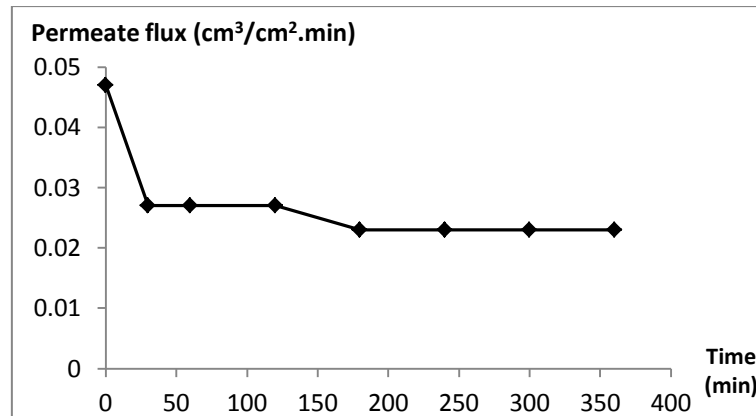
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar

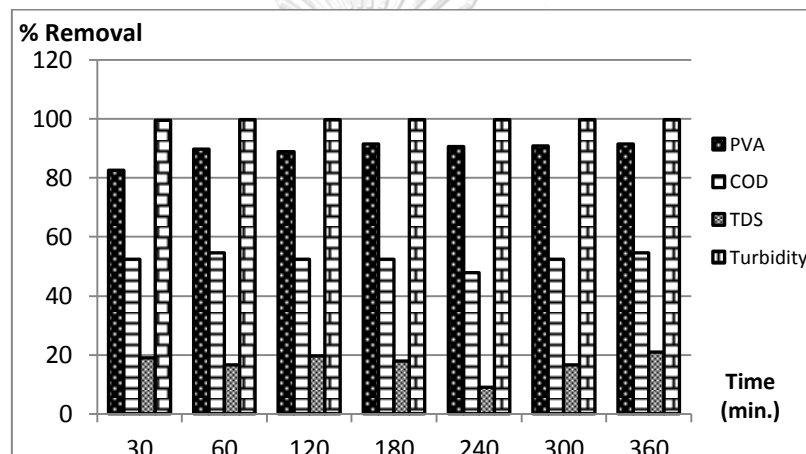
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar ที่ขนาดรูพรุน 150 kDa ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 360 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 1.5 bar (รูปที่ 4.56) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.047 เหลือ 0.023 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.57)



รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา

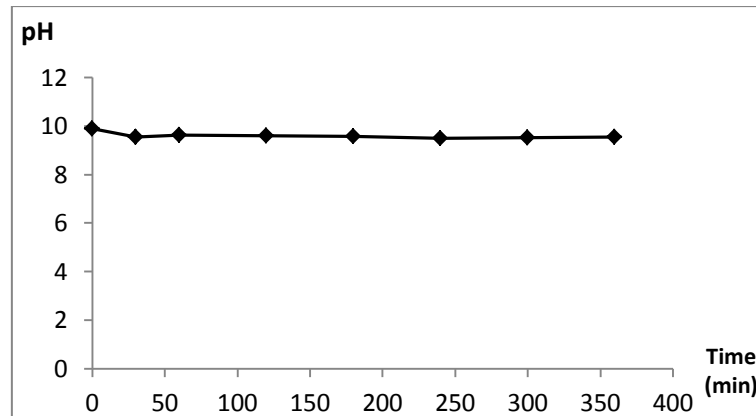


รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

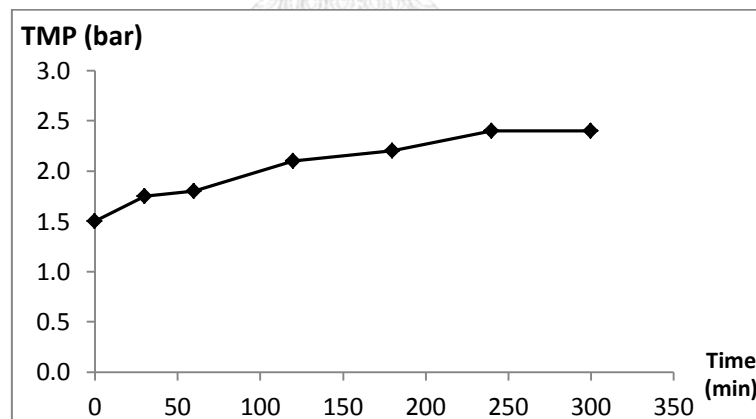
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar ขนาดรูพรุน 150 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 91.47%, 54.54%, 20.92% และ 99.78% (รูปที่ 4.58) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.59)



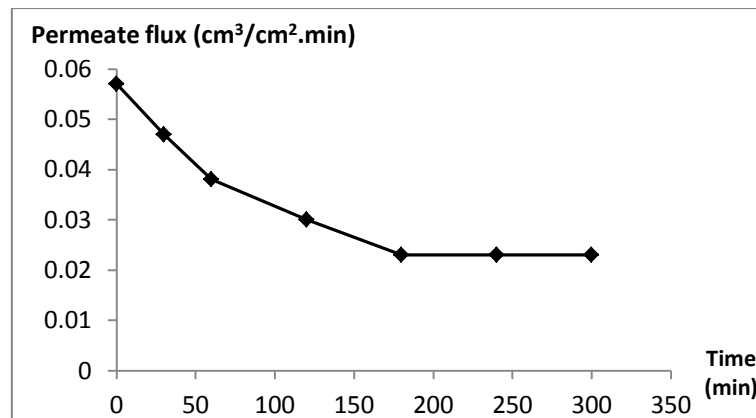
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar

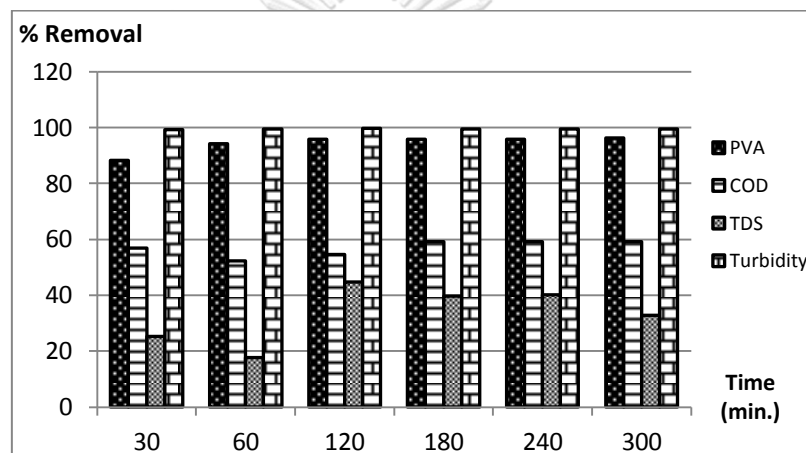
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar ที่ขนาดรูพรุน 150 kDa ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 300 นาที โดยมียค่าความดันเท่ากับ 2.4 bar (รูปที่ 4.60) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.057 เหลือ 0.023 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.61)



รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

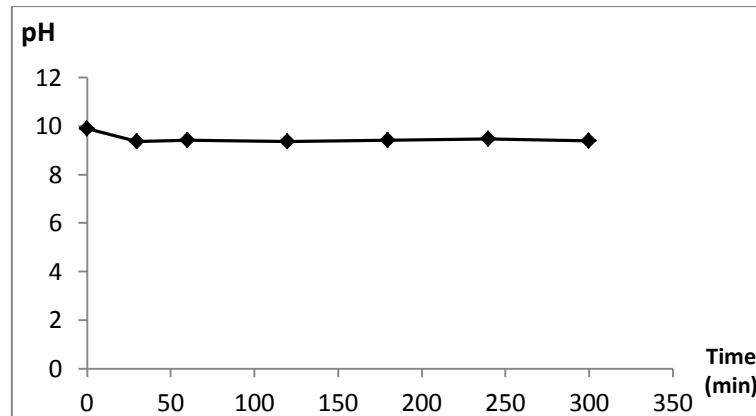


รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิวอีในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

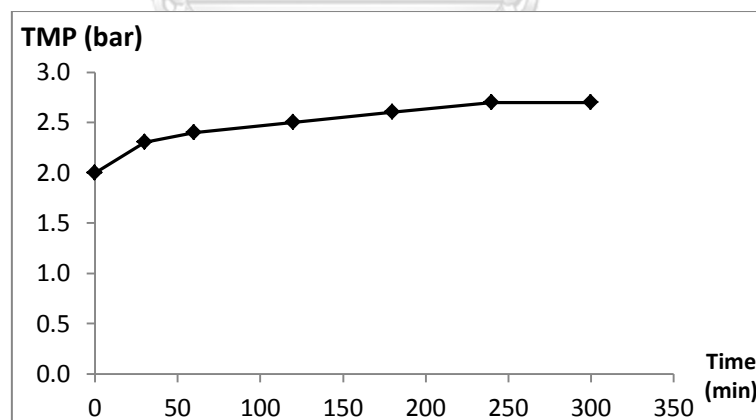
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar ขนาดรูพรุน 150 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารฟิวอีรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิวอี ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 96.18%, 59.08%, 32.85% และ 99.58% (รูปที่ 4.62) สำหรับค่าฟิวเอชของน้ำเสียฟิวอีสั่งเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าฟิวเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.63)



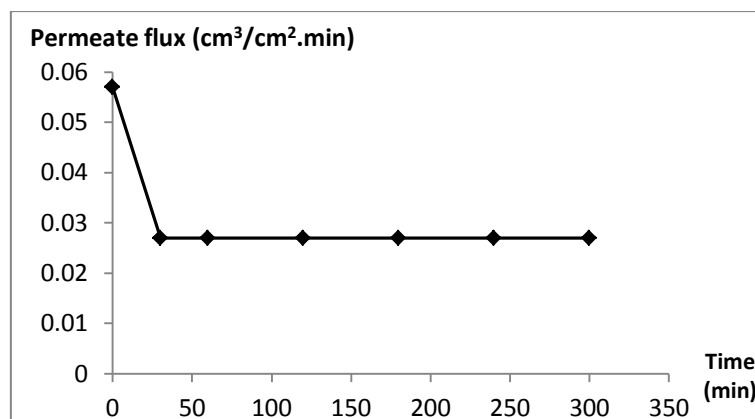
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 2 bar

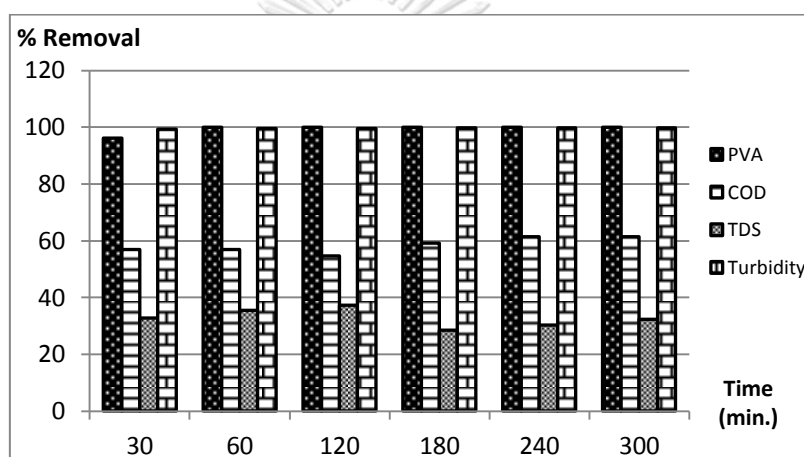
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 2 bar ที่ขนาดรูพรุน 150 kDa ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 300 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 2.7 bar (รูปที่ 4.64) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.057 เหลือ 0.027 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.65)



รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

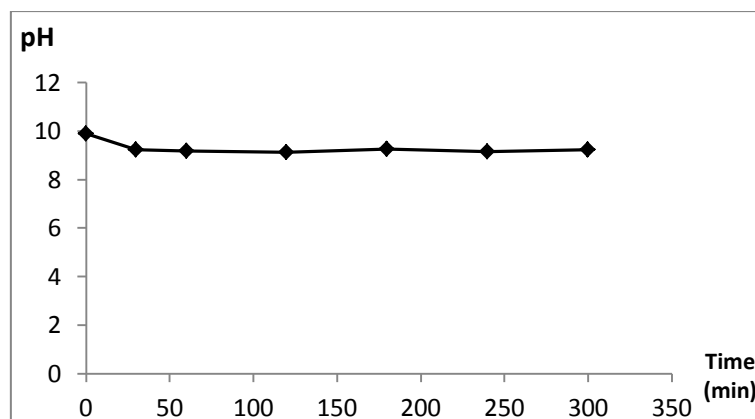


รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 2 bar ขนาดรูพรุน 150 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 99.99%, 61.37%, 32.22% และ 99.63% (รูปที่ 4.66) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.67)

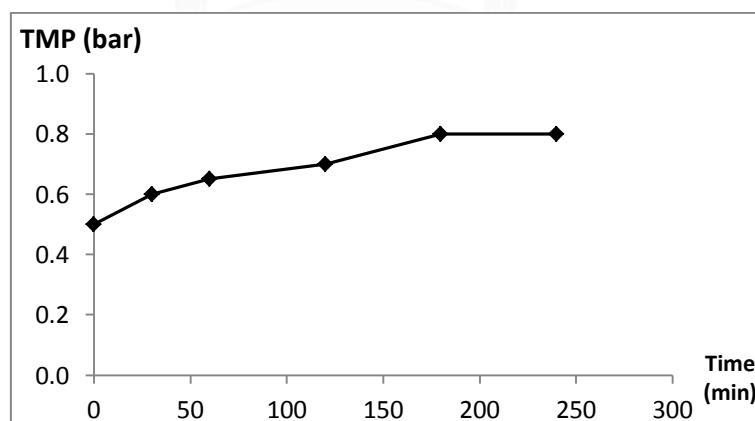


รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

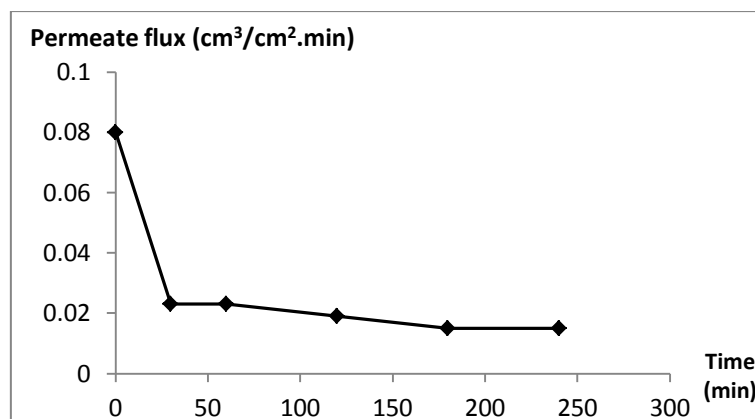
4.2.2.2 ขนาดรูพรุน 300 kDa

- ความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar

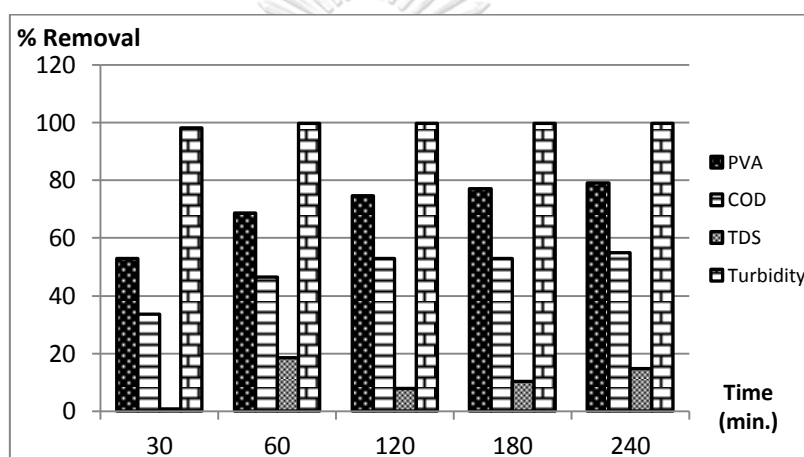
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 240 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 0.8 bar (รูปที่ 4.68) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.08 เหลือ $0.015 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.69)



รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

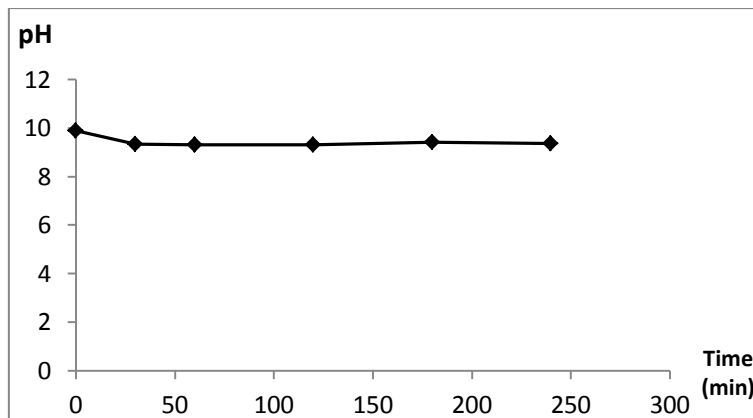


รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

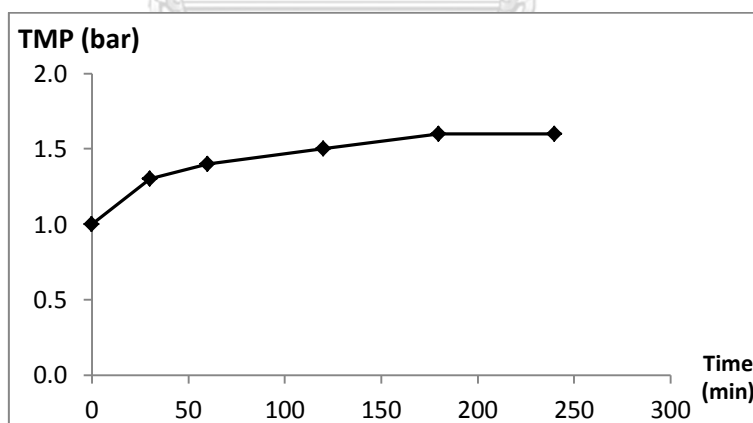
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 0.5 bar ขนาดรูพรุน 300 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 79.11%, 54.96%, 14.65% และ 99.73% (รูปที่ 4.70) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.71)



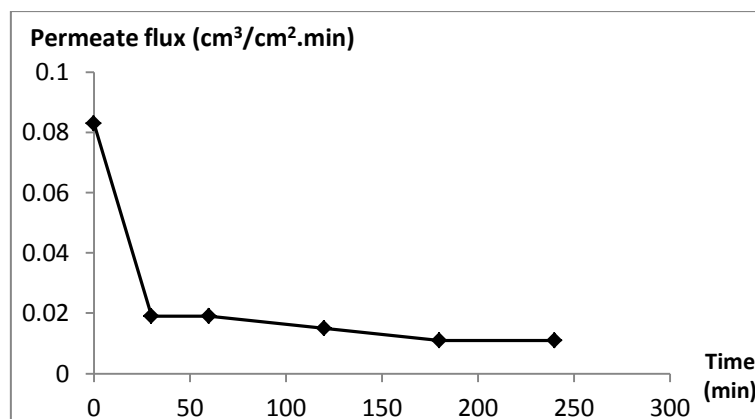
รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar

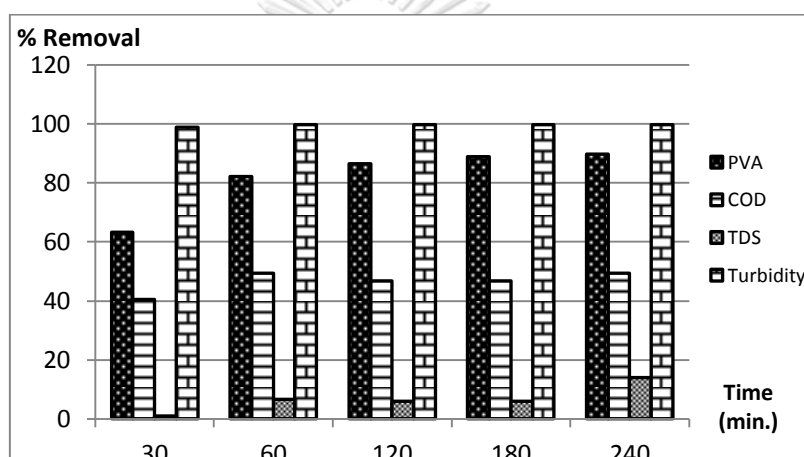
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar ที่ขนาดรูพรุน 300 kDa ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 240 นาที โดยมีความดันเท่ากับ 1.6 bar (รูปที่ 4.72) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.083 เหลือ 0.011 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.73)



รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

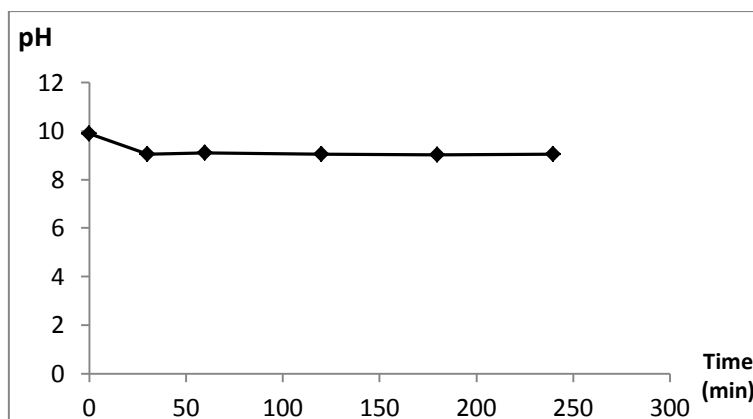


รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

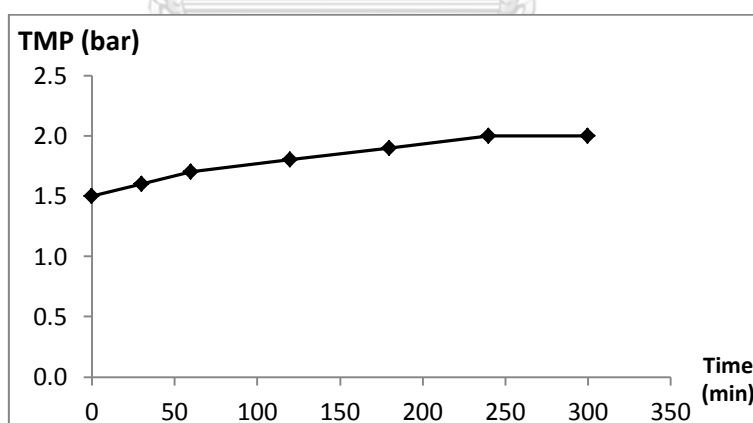
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 1 bar ขนาดรูพรุน 300 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 89.71%, 49.24%, 14.02% และ 99.7% (รูปที่ 4.74) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.75)



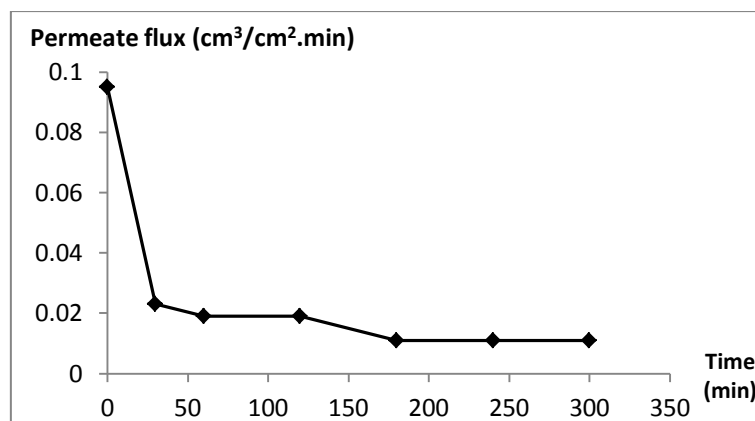
รูปที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar

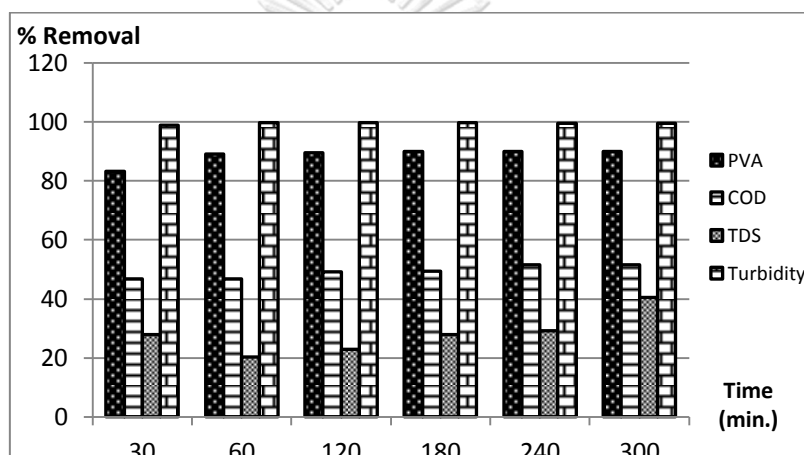
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar ที่ขนาดรูพรุน 300 kDa ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 300 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 2 bar (รูปที่ 4.76) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มเดินระบบ 0.095 เหลือ 0.011 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.77)



รูปที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา

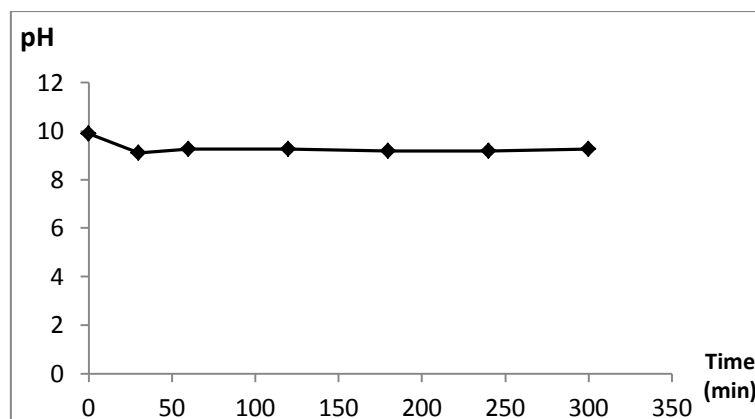


รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

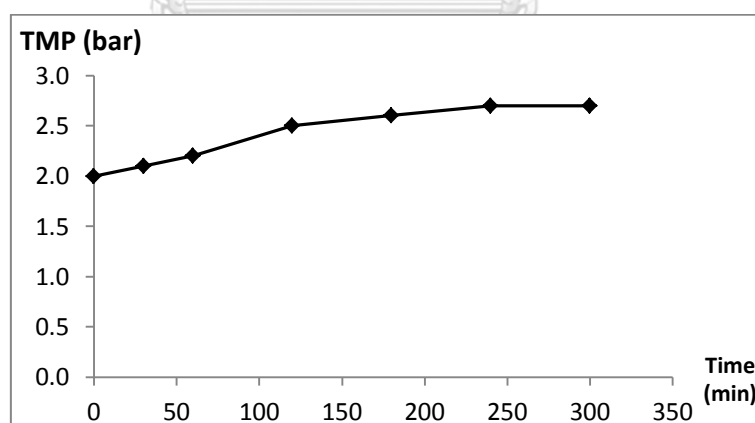
นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 1.5 bar ขนาดรูพรุน 300 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 90%, 51.45%, 40.38% และ 99.53% (รูปที่ 4.78) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.79)



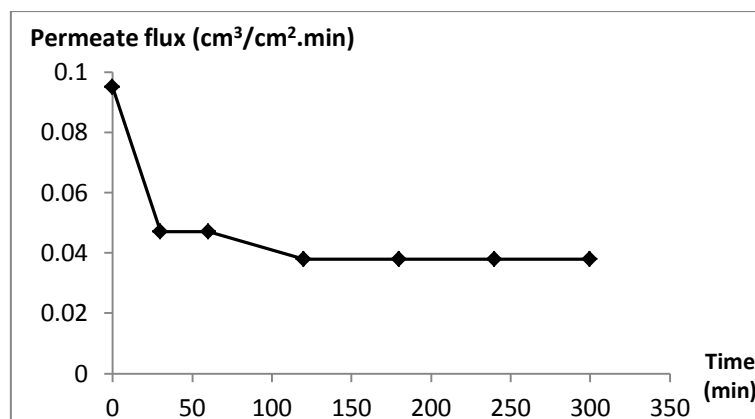
รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

- ความดันทรานส์เมมเบรน 2 bar

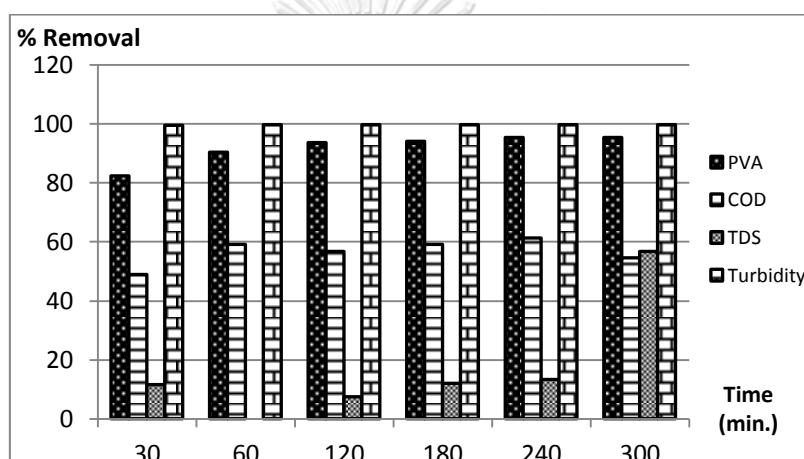
จากการศึกษาค่าความดันทรานส์เมมเบรน 2 bar ที่ขนาดรูพรุน 300 kDa ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่คือ 300 นาที โดยมีค่าความดันเท่ากับ 2.7 bar (รูปที่ 4.80) ค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงจากเวลาเริ่มต้นระบบ 0.095 เหลือ 0.038 $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ (รูปที่ 4.81)



รูปที่ 4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันทรานส์เมมเบรน กับเวลา



รูปที่ 4.81 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับเวลา

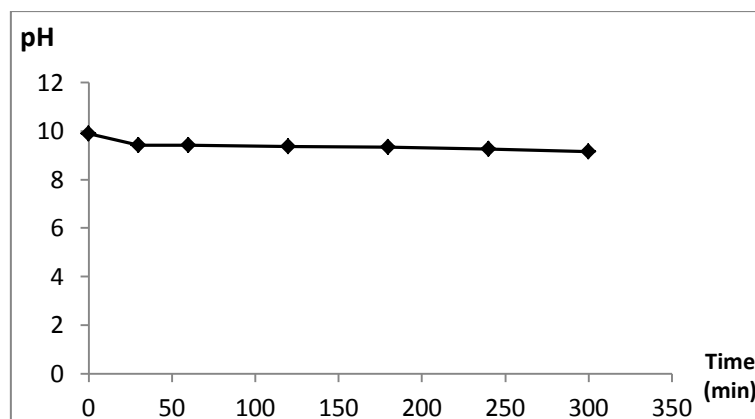


รูปที่ 4.82 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งต่อ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับเวลา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

นอกจากนี้พบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรน 2 bar ขนาดรูพรุน 300 kDa เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอรวมไปถึงการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอ ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 95.29%, 54.54%, 56.70% และ 99.67% (รูปที่ 4.82) สำหรับค่าพีเอชของน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย (รูปที่ 4.83)

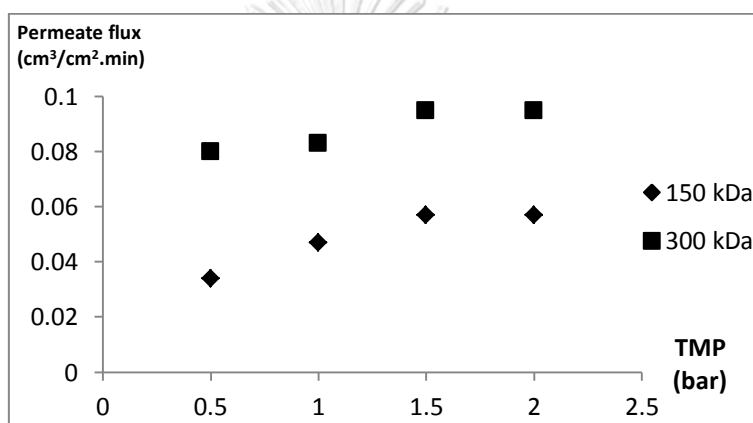


รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา

จากการทดลองพบว่าการเติมสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1,000 mg/L ร่วมกับสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุเข้มข้น 0.1 mg/L ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 สามารถกำจัดความขุ่นลดลงจาก 800 เหลือ 120 NTU คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 85 และสามารถกำจัดสารฟิวเอและค่าซีไอได้ดีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 19.05 และ 21.43 สำหรับปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4,500 mg/L เป็น 7,967 mg/L โดยปริมาณของแข็งละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นอาจมาจากการเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำเสีย กล่าวได้ว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถกำจัดสารแขวนลอยในน้ำเสียที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ได้ซึ่งจะช่วยกำจัดความขุ่นเพื่อลดปัญหาการอุดตัน (Fouling) ที่ผิวเมมเบรนได้ (Choo, Choi และ Hwang, 2007)

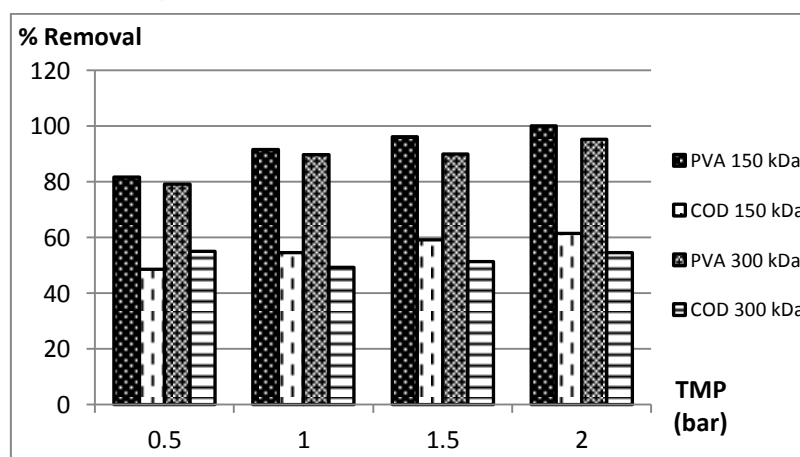
เมื่อศึกษาผลของความดันทรานส์เมมเบรนและขนาดรูพรุนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารฟิวเอ จากการทดลองพบว่าที่ความดันทรานส์เมมเบรนเท่ากับ 2 bar มีค่าฟลักซ์ในการซึมผ่านเมมเบรนมากที่สุดของทั้ง 2 ขนาดรูพรุนคือ 150 และ 300 kDa กล่าวได้ว่าเมื่อค่าความดันทรานส์เมมเบรนเพิ่มขึ้น อัตราการกรองน้ำหรือค่าฟลักซ์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่รูพรุนขนาดใหญ่ (300 kDa) จะมีค่าฟลักซ์สูงกว่า (Barredo-Damas และคณะ, 2010) (รูปที่ 4.84) นอกจากนี้พบว่าที่ความดัน 2 bar มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิวเอมากที่สุด โดยที่ขนาดรูพรุน 150 kDa สามารถกำจัดสารฟิวเอได้ทั้งหมด (รูปที่ 4.85) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิวเอด้วยอัลตราฟิล เทรซันเมมเบรนที่ ขนาดรูพรุน 150 kDa และ 300 kDa ที่ความดันทรานส์เมมเบรนเท่ากับ 2 bar ในน้ำเสียฟิวเอสังเคราะห์ (ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L) และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งหลังกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.86

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแ่งสูงกว่าในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ กล่าวได้ว่าเนื่องจากน้ำเสียกระบวนการลอกแ่งมีสารแขวนลอยและคอลลอยด์สูงส่งผลให้สารดังกล่าวสะสมอยู่ในรูพรุนและช่วยในการดักจับสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแ่ง ทั้งนี้พบว่าน้ำในส่วน Permeate ยังคงมีปริมาณของแข็งละลายน้ำ และค่าซีไอดีที่สูง (5,400 และ 3,045 mg/L ตามลำดับที่สภาวะคงที่) แสดงว่าในน้ำเสียกระบวนการลอกแ่งอาจมีสารชนิดอื่นเป็นองค์ประกอบนอกเหนือจากสารพีวีเอ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FT-IR ตามรูปที่ 4.87 ในช่วงค่าการดูดกลืนแสงตั้งแต่ $500-4,000\text{ cm}^{-1}$

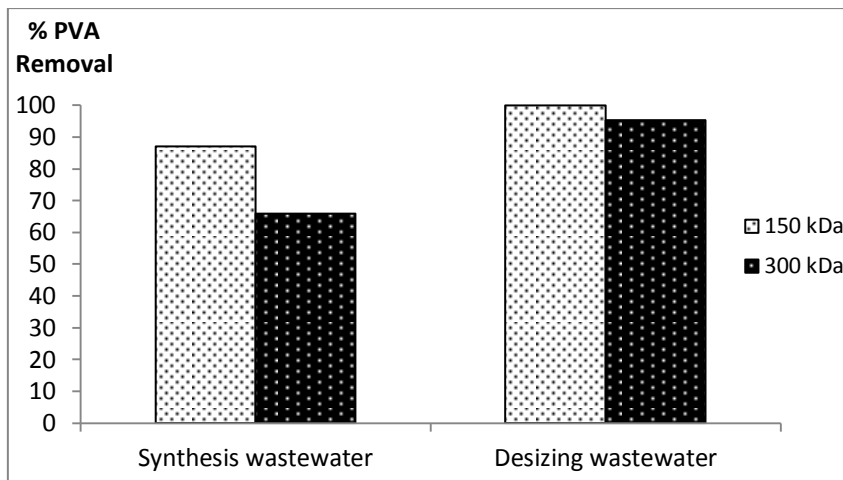


รูปที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การซึมผ่านเมมเบรน กับค่าความดันทรานส์เมมเบรน

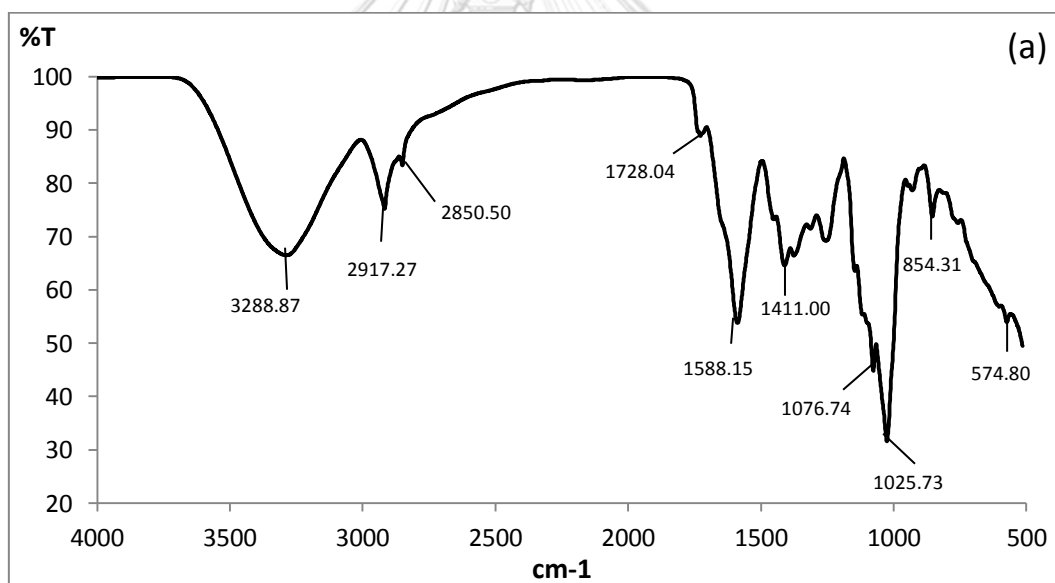
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



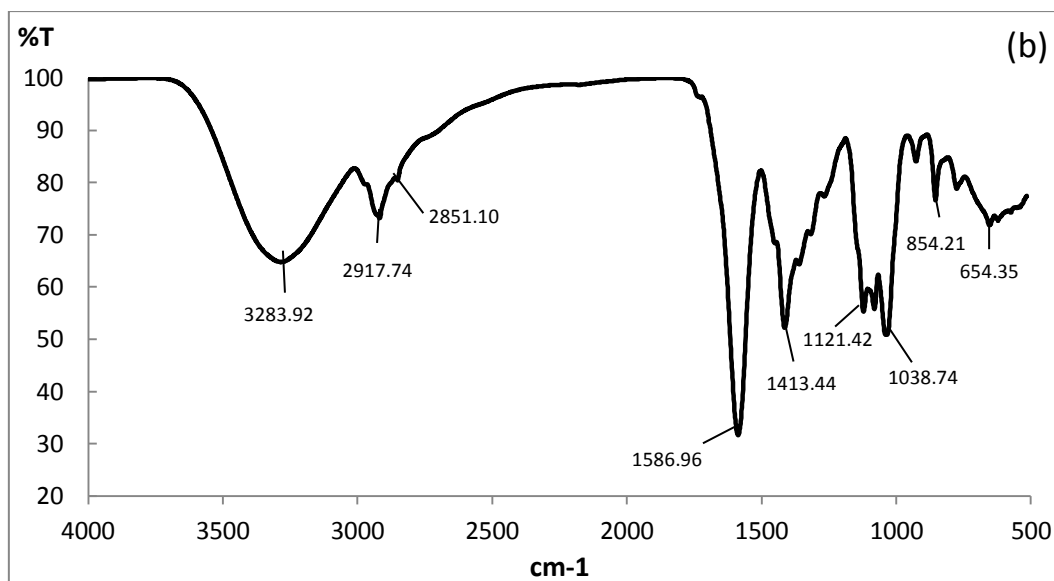
รูปที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแ่งต่อค่าซีไอดี กับความดันทรานส์เมมเบรน



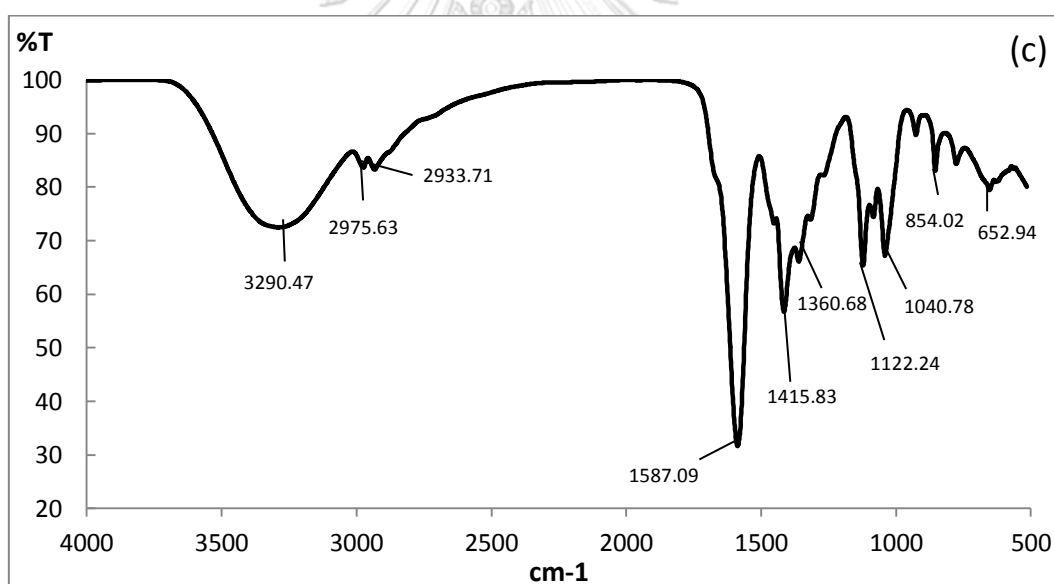
รูปที่ 4.86 ประสิทธิภาพการกำจัดสารพีวีเอที่ขนาดรูพรุน 150 และ 300 kDa ในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง



รูปที่ 4.87 (a)



รูปที่ 4.87 (b)



รูปที่ 4.87 (a) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง (b) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน (c) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งหลังกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

จากรูปที่ 4.87 พีคที่ความยาวคลื่น 3288 และ 1025 cm⁻¹ คือหมู่แอลกอฮอล์ (-OH) ที่ความยาวคลื่น 1588 cm⁻¹ และที่ความยาวคลื่น 2917 cm⁻¹ เป็นหมู่เอไมด์ (N-H) และหมู่

คาร์บอกซิล (-COOH) ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเติมสารสร้างตะกอนจนเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและผ่านกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนพบว่าสามารถกำจัดสารพีวีเอได้ส่งผลให้ค่า %T ในรูปที่ 4.87(b) และ (c) ลดลง นอกจากนี้ น้ำในส่วน permeate หลังกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันยังคงมีค่าซีไอดีและปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง กล่าวได้ว่าหมู่คาร์บอกซิลที่พบคือ เกลือโซเดียมอัลจิเนต โดยอนุภาคของเกลือมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถดักจับด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนได้ สำหรับสารกลุ่มเอไมด์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งมีขนาดเล็กจนสามารถผ่านรูพรุนของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนได้ จึงทำให้ค่าซีไอดีหลังกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันยังคงมีค่าสูง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถสรุปผลการทดลองและมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การกำจัดสารฟิเวอด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์และน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งพบว่าประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก โดยสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ เป็นสารสร้างตะกอนที่ดีที่สุดในแง่ของการกำจัดสารฟิเวอ ร่วมกับสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ (Poly ethylene oxide) ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/L โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์ 10.5 g/L ที่ความเข้มข้นของ $MgCl_2$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 500 mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารฟิเวอเท่ากับ 21.90 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 สำหรับการทดลองน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน $MgCl_2$ ร่วมกับสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุเข้มข้น 0.1 mg/L ในการกำจัดสาร ฟิเวอมากที่สุดเท่ากับ 1,000 mg/L โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารฟิเวอเท่ากับ 14.83 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 กล่าวได้ว่าสารฟิเวออาจมีขนาดเล็กจนไม่สามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

2. การศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในการกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์โดยภาพรวมพบว่าประสิทธิภาพสูงประมาณ 70-90 % โดยที่ขนาดรูพรุน 150 kDa สามารถกำจัดสารฟิเวอได้มากที่สุดที่ความดันทรานส์เมมเบรนเท่ากับ 2 bar กล่าวได้ว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถดักจับสารฟิเวอในน้ำเสียฟิเวอสังเคราะห์ ซึ่งจะช่วยลดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งละลายน้ำ และความขุ่นได้

3. การศึกษากระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดสารฟิเวอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง พบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งซึ่งจะช่วยลดการอุดตันในระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนและระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถกำจัดสารฟิเวอได้มากที่สุดที่ขนาดรูพรุน 150 kDa ทั้งนี้

น้ำในส่วน permeate พบว่ายังคงมีค่าซีโอดีและปริมาณของแข็งละลายน้ำที่สูง กล่าวได้ว่าระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถกำจัดสารพีวีเอได้ แต่ยังคงมีสารชนิดอื่นที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งมีขนาดเล็กหลุดผ่านรูพรุนของเมมเบรนออกไปได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากน้ำเสียกระบวนการลอกแป้งมีความขุ่นที่สูง ดังนั้นควรมีการติดตั้งระบบบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบโคแอกกูเลชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน รวมไปถึงลดภาระที่ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

2. กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถกำจัดสารพีวีเอได้ประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความขุ่นในน้ำเสียรวมถึงความเข้มข้นสารพีวีเอ ถ้ามีค่าสูงเกินไปอาจจะทำให้เมมเบรนอุดตัน ทำให้ต้องทำการล้างเมมเบรนบ่อยครั้ง

3. กระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพีวีเอในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง แต่หลังจากการกรองด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนยังคงมีค่าซีโอดีและปริมาณของแข็งละลายน้ำที่สูง จึงต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นถัดไปเพื่อให้มีคุณภาพตามมาตรฐานก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชั้นทอง สุนทรภา. (2547). เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane Separation Technology). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรวิทย์ จันทร์ชนะ. (2542). การบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยวิธีออกซิเดชันและการตกตะกอน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- นรา รัตนพันธ์. (2552). การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ร่วมกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- แน่นน้อย วิจิตรจรรยากุล. (2543). การบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังโดยวิธีตกตะกอนและออกซิเดชัน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. (2553). กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกคูเลชัน (Flocculation). บทความออนไลน์. http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=582
- เพิ่มศักดิ์ กาญจนบุตร. (2550). การกำจัดซีโอดี และสีของน้ำกากส่าโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มกับ โพลีเมอร์ และถ่านกัมมันต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน. (2551). ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อนต่อประสิทธิภาพของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนต้นแบบในการผลิตน้ำประปา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. (2542). คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

- Anis, P., Kayar, H. M. and Eren, H. A. (2007). Sizing Agents Recovery By Ultrafiltration: Effects of Operating Conditions. Journal of Biological & Environmental Science 1(2), 93-98.
- Baker, R. W. (2004). Membrane technology and applications (2 ed.). West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M. I., Bes-Piá, A., Iborra-Clar, M. I., Iborra-Clar, A. and Mendoza-Roca, J. A. (2010). Ceramic membrane behavior in textile wastewater ultrafiltration. Desalination 250(2), 623-628.
- Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M. I., Iborra-Clar, M. I. and Mendoza-Roca, J. A. (2012). Application of tubular ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of integrated textile wastewaters. Chemical Engineering Journal 192, 211-218.
- Basile, A., Cassano, A. and Rastogi, N. K. (2015). Advance in Membrane Technologies for Water Treatment (1 ed.). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Chang, H., Liang, H., Qu, F., Shao, S., Yu, H., Liu, B., Gao, W. and Li, G. (2016). Role of backwash water composition in alleviating ultrafiltration membrane fouling by sodium alginate and the effectiveness of salt backwashing. Journal of Membrane Science 499, 429-441.
- Choi, H., Zhang, K., Dyonysiou, D. D., Oerther, D. B. and Sorial, G. A. (2005). Influence of cross-flow velocity on membrane performance during filtration of biological suspension. Journal of Membrane Science 248, 189-199.
- Choo, K.-H., Choi, S.-J. and Hwang, E.-D. (2007). Effect of coagulant types on textile wastewater reclamation in a combined coagulation/ultrafiltration system. Desalination 202, 262-270.
- Ghaly, A., Ananthashankar, R., Alhattab, M. and Ramakrishnan, V. (2014). Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. Journal of Chemical Engineering & Process Technology 5:182.

- Harrelkas, F., Azizi, A., Yaacoubi, A., Benhammou, A. and Pons, M. N. (2009). Treatment of textile dye effluents using coagulation/flocculation coupled with membrane processes or adsorption on powdered activated carbon. Desalination **235**, 330-339.
- Hwang, K.-J., Chan, C.-S. and Tung, K.-L. (2009). Effect of backwash on the performance of submerged membrane filtration. Journal of Membrane Science **330(1-2)**, 349-356.
- Lee, B.-B., Choo, K.-H., Chang, D. and Choi, S.-J. (2009). Optimizing the coagulant dose to control membrane fouling in combined coagulation/ultrafiltration systems for textile wastewater reclamation. Chemical Engineering Journal **155(1-2)**, 101-107.
- Lin, S. H. and Lan, W. J. (1995). Polyvinyl alcohol recovery by ultrafiltration: effects of membrane type and operating conditions. Separations Technology **5**, 97-103.
- Lin, S. H. and Lo, C. C. (1997). Fenton process for treatment of desizing wastewater. Water Research **31**, 2050-2056.
- Patel, H. and Vashi, R. T. (2015). Characterization and Treatment of Textile Wastewater. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Porter, J. J. (1998). Recovery of poly vinyl alcohol and hot water from the textile wastewater using thermally stable membranes. Journal of Membrane Science **151**, 45-53.
- Sahu, O. P. and Chaudhari, P. K. (2013). Review on Chemical treatment of Industrial Waste Water. Journal of Applied Sciences and Environmental Management **17(2)**.
- Sakazawa, C., Shima, M., Taniguchi, Y. and Kato, N. (1981). Symbiotic utilization of polyvinyl alcohol by mixed cultures. Applied and Environmental Microbiology **41(1)**, 261-267.
- Saleh, N. J., Alhelaly, A., Ali, J. M. and Alsathy, Q. (2009). Recovery of PVA Using Polyethersulfone (PES) Hollow fiber Ultrafiltration Membranes: Part II: Effect of Carboxymethyl Cellulose (CMC) Concentration. Journal of Engineering and Technology Management **27(5)**, 1008-1016.

Shi, X., Tal, G., Hankins, N. P. and Gitis, V. (2014). Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. Journal of Water Process Engineering **1**, 121-138.

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

Wang, L., Wang, X. and Fukushi, K.-i. (2008). Effects of operational conditions on ultrafiltration membrane fouling. Desalination **229**, 181-191.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ก1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์

ตารางที่ ก-1.1.1 ผลการทดลองสารสร้างตะกอนโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสารโพลิเมอร์

0.05 mg/L

	1	2	3	4	5	6
□ mg/L	50	100	250	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
pH	5.6	5.15	4.67	4.43	4.3	4.23
ความขุ่น(NTU)	0.93	0.75	0.91	0.8	0.81	0.87
TDS (mg/L)	6500	6600	5200	5300	5400	5400
	6500	6300	5000	4900	5500	5400
	6500	6400	5100	5100	5500	5400
PVA (g/L)	10.12	9.80	10.20	10.10	10.35	10.48
	10.24	10.02	10.20	10.18	10.28	10.48
	10.18	10	10.2	10.14	10.32	10.48
COD (mg/L)	15695.55	15998.40	15695.55	15695.55	15695.55	15695.55
	15695.55	14544.00	15695.55	15695.55	17219.39	17219.39
	15696	15271	15696	15696	16457	16457

ตารางที่ ก-1.1.2 ผลการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนโพลีลูมิเนียมคลอไรด์

	pH 4	pH 6	pH 7	pH 8
□ mg/L	100	100	100	100
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05
pH เริ่มต้น	4.29	6.2	7.17	8.2
pH	4.32	5.06	5.07	5.05
ความขุ่น(NTU)	1.1	1.15	1.07	1.06
TDS(mg/L)	5500	5900	5900	4900
	5500	6000	5900	4700
	5500	5950	5900	4800
PVA g/L	10.07	9.67	10.47	1.47
	10.50	10.50	10.50	10.50
	10.29	10.08	10.5	10.5
COD mg/L	17404.70	15063.26	16624.22	16624.22
	15063.26	15063.26	16624.22	16624.22
	16234	15063	16624	16624

ตารางที่ ก-1.1.3 ผลการทดลองสารสร้างตะกอนอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสารโพลีเมอร์ 0.05 mg/L

	1	2	3	4	5	6
□ mg/L	50	100	250	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
pH	4.9	4.52	4.25	4.1	3.86	3.89
ความขุ่น(NTU)	1.19	1.13	1.11	1.05	1	0.91
TDS(mg/L)	4900	4500	6100	5100	5300	6000
	4700	4600	5700	5400	5000	5900
	4800	4550	5900	5250	5150	5950
PVA g/L	10.12	10.24	10.42	10.50	10.35	9.70
	10.50	10.50	10.42	10.26	10.21	10.10
	10.31	10.37	10.42	10.38	10.28	9.9
COD mg/L	18470.88	17016.48	17016.48	17016.48	17016.48	15063.26
	18470.88	18470.88	18470.88	17016.48	17016.48	15063.26
	18471	17744	17744	17017	17017	15063

ตารางที่ ก-1.1.4 ผลการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนอลูมิเนียมคลอไรด์

	pH 4	pH 6	pH 7	pH 8
□ mg/L	1000	1000	1000	1000
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05
pH เริ่มต้น	4.54	6.21	7.31	8.71
pH	3.56	3.69	3.7	3.71
ความขุ่น(NTU)	1.04	1.01	1.06	1.03
TDS(mg/L)	7100	7200	6300	5600
	6800	6800	5500	5000
	6950	7000	5900	5300
PVA g/L	9.90	10.07	10.00	9.98
	10.50	10.30	10.00	10.08
	10.2	10.19	10	10.03
COD mg/L	14282.78	15063.26	14950.00	14950.00
	15063.26	14282.78	14950.00	14950.00
	14674	14674	14950	14950

ตารางที่ ก-1.1.5 ผลการทดลองสารสร้างตะกอนแมกนีเซียมคลอไรด์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นสารโพลีเมอร์ 0.05 mg/L

	1	2	3	4	5	6
□ mg/L	50	100	250	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
pH	5.78	5.73	5.76	5.73	5.74	5.68
ความขุ่น(NTU)	1.1	1.05	1.01	1.01	0.95	1.01
TDS(mg/L)	4700	5500	4800	5000	5300	5000
	4700	5400	5200	5200	5100	5000
	4700	5450	5000	5100	5200	5000
PVA g/L	9.53	9.48	9.56	9.33	9.58	9.15
	9.70	9.90	9.56	9.64	9.26	9.65
	9.62	9.69	9.56	9.48	9.42	9.4
COD mg/L	16950.00	16950.00	16950.00	15450.00	16950.00	15450.00
	16950.00	16950.00	16950.00	16950.00	15450.00	15450.00
	16950	16950	16950	16200	16200	15450

ตารางที่ ก-1.1.6 ผลการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนแมกนีเซียมคลอไรด์

	pH 4	pH 6	pH 7	pH 8
□ mg/L	1000	1000	1000	1000
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05
pH เริ่มต้น	4.78	6.33	7.31	8.36
pH	5.02	6.44	6.85	7.02
ความขุ่น(NTU)	1.19	1.19	1.14	1.17
TDS(mg/L)	4800	4800	5200	4900
	4900	4800	4900	4900
	4850	4800	5050	4900
PVA g/L	9.56	9.16	9.61	9.20
	10.19	10.43	9.85	9.50
	9.88	9.8	9.73	9.35
COD mg/L	16624.22	16624.22	16624.22	16624.22
	16624.22	16624.22	15843.74	15063.26
	16624	16624	16234	15844

ตารางที่ ก-1.1.7 ผลการทดลองสารสร้างตะกอนโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสารโพลิเมอร์ 0.1 mg/L

	1	2	3	4	5	6
□ mg/L	50	100	250	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
pH	5.16	4.96	4.58	4.37	4.26	4.18
ความขุ่น(NTU)	1.18	1.09	1.13	1.14	1.17	1.18
TDS(mg/L)	5100	5900	6300	5500	6600	5600
	5100	6000	5400	6000	6700	5600
	5100	5950	5850	5750	6650	5600
PVA g/L	9.81	9.99	9.97	10.25	10.40	10.40
	9.88	10.02	10.06	9.93	10.40	10.40
	9.85	10	10.02	10.09	10.4	10.4
COD mg/L	14544.00	15450.00	15998.40	15998.40	17452.80	17452.80
	15998.40	15450.00	14544.00	15998.40	15998.40	15998.40
	15271	15450	15271	15998	16726	16726

ตารางที่ ก-1.1.8 ผลการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนโพลีลูมิเนียมคลอไรด์

	pH 4	pH 6	pH 7	pH 8
□ mg/L	50	50	50	50
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1
pH เริ่มต้น	4.77	6.25	7.24	8.38
pH	4.59	5.22	5.32	5.4
ความขุ่น(NTU)	1.05	1.17	1.17	1.2
TDS(mg/L)	5100	6800	4500	5300
	5500	6700	4700	5400
	5300	6750	4600	5350
PVA g/L	10.38	10.38	10.50	10.50
	10.50	10.50	10.50	10.50
	10.44	10.44	10.5	10.5
COD mg/L	14661.53	15405.77	16150.01	16150.01
	15405.77	14661.53	16150.01	16150.01
	15034	15034	16150	16150

ตารางที่ ก-1.1.9 ผลการทดลองสารสร้างตะกอนอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสารโพลิเมอร์ 0.1 mg/L

	1	2	3	4	5	6
□ mg/L	50	100	250	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
pH	4.71	4.46	4.18	4.03	3.89	3.83
ความขุ่น(NTU)	0.99	1.11	1.11	1.05	0.91	0.95
TDS(mg/L)	4900	4800	4600	6100	5200	5700
	5000	5000	4700	5800	5600	5400
	4950	4900	4650	5950	5400	5550
PVA g/L	9.21	9.35	9.63	9.37	10.50	10.18
	8.56	9.21	9.46	9.16	9.32	9.46
	8.89	9.28	9.55	9.27	9.91	9.82
COD mg/L	15450.00	15998.40	16950.00	15998.40	16950.00	16950.00
	15450.00	15998.40	15450.00	15998.40	16950.00	16950.00
	15450	15998	16200	15998	16950	16950

ตารางที่ ก-1.1.10 ผลการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนอลูมิเนียมคลอไรด์

	pH 4	pH6	pH 7	pH 8
□ mg/L	50	50	50	50
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1
pH เริ่มต้น	4.7	6.17	7.46	8.15
pH	4.46	4.76	4.87	4.83
ความขุ่น(NTU)	1.13	1.1	1.15	1.18
TDS(mg/L)	4700	5000	5500	5900
	4900	4900	5400	5600
	4800	4950	5450	5750
PVA g/L	9.70	9.66	9.78	9.75
	10.10	10.26	9.96	9.96
	9.9	9.96	9.87	9.86
COD mg/L	16150.01	15405.77	15405.77	15405.77
	15405.77	15405.77	15405.77	15405.77
	15779	15406	15406	15406

ตารางที่ ก-1.1.11 ผลการทดลองสารสร้างตะกอนแมกนีเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสารโพลิเมอร์ 0.1 mg/L

	1	2	3	4	5	6
□ mg/L	50	100	250	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
pH	5.82	5.83	5.83	5.74	5.77	5.81
ความขุ่น(NTU)	0.8	0.77	0.72	0.79	0.82	0.94
TDS(mg/L)	4900	4900	5000	5900	5500	6500
	4700	5300	4900	5700	5500	6400
	4800	5100	4950	5800	5500	6450
PVA g/L	9.39	9.07	9.11	8.29	8.74	8.85
	9.39	9.56	9.52	8.42	8.76	9.37
	9.39	9.32	9.32	8.36	8.75	9.11
COD mg/L	16950.00	16950.00	16950.00	15450.00	15450.00	16950.00
	16950.00	16950.00	18450.00	15450.00	15450.00	15450.00
	16950	16950	17700	15450	15450	16200

ตารางที่ ก-1.1.12 ผลการทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนแมกนีเซียมคลอไรด์

	pH 4	pH 6	pH 7	pH 8
□ mg/L	500	500	500	500
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1
pH เริ่มต้น	4.76	6.55	7.61	8.42
pH	4.95	6.63	6.93	7.04
ความขุ่น(NTU)	1.01	1.08	1.06	1.05
TDS(mg/L)	6300	6700	6600	5800
	5800	6100	5900	6000
	6050	6400	6250	5900
PVA g/L	9.25	8.74	8.69	8.16
	9.25	9.08	8.78	8.24
	9.25	8.91	8.74	8.20
COD mg/L	15405.77	14661.53	14661.53	13173.05
	14661.53	13917.29	13917.29	13173.05
	15034	14289	14289	13173

ก-1.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

ตารางที่ ก-1.2.1 ผลการทดลองความเข้มข้นของแมกนีเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นสารโพลิเมอร์ 0.05 mg/L

	1	2	3	4
□ mg/L	500	800	1000	2000
polymer (mg/L)	0.05	0.05	0.05	0.05
pH	7.46	7.42	7.46	7.44
ความขุ่น(NTU)	633	353	155	90
TDS (mg/L)	10900	10300	12100	13500
	10700	10600	11800	13500
	10800	10450	11950	13500
PVA (g/L)	11.5	12	11.38	11.08
	11.5	11.38	11.2	11.08
	11.5	11.69	11.29	11.08
COD (mg/L)	57365.00	56280.96	51590.88	55851.84
	57365.00	51590.88	56280.96	55851.84
	57365	53936	53936	55852

ตารางที่ ก-1.2.2 ผลการทดลองความเข้มข้นของแมกนีเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นสารโพลิเมอร์ 0.1 mg/L

	1	2	3	4
□ mg/L	300	500	800	1000
polymer (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.1
pH	7.88	7.77	7.69	7.44
ความขุ่น(NTU)	372	363	213	115
TDS (mg/L)	12500	13300	13500	13500
	12500	13500	13600	13500
	12500	13400	13550	13500
PVA (g/L)	10.6	11.54	10.82	10.18
	10.6	10.48	10.56	10.26
	10.6	11.01	10.69	10.22
COD (mg/L)	56280.96	55851.84	55851.84	51311.04
	51590.88	55851.84	55851.84	55851.84
	53936	55852	55852	53581

ก-2.1 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ขนาดรูพรุน 300 kDa
 ตารางที่ ก-2.1.1 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอที่ความเข้มข้น 200 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	20	14.5	13.5	13	12	11	10
Permeate flux (cm/min)	0.38	0.275	0.256	0.247	0.228	0.209	0.19
Pressure (bar)	2	2.2	2.35	2.5	2.65	2.7	2.7
pH	5.8	5.75	5.67	5.75	5.74	5.47	5.72
Turbidity (NTU)	0.23	0.15	0.11	0.12	0.12	0.17	0.14
TDS (mg/L)		250	240	200	200	150	50
		200	200	200	100	50	50
	250	225	220	200	150	100	50
COD (mg/L)		300	300	285	285	285	285
		300	300	285	300	300	285
	310	300	300	285	293	293	285
PVA (mg/L)		175	175	175	141	141	141
		175	175	141	175	141	141
	200	175	175	158	158	141	141

ตารางที่ ก-2.1.2 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอที่ความเข้มข้น 400 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	31	9	8	6	5.5	5	4.5
Permeate flux (cm/min)	0.588	0.171	0.152	0.114	0.104	0.095	0.085
Pressure (bar)	2	2.3	2.4	2.55	2.6	2.7	2.7
pH	5.74	5.7	5.58	5.65	5.6	5.47	5.59
Turbidity (NTU)	0.34	0.18	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16
TDS (mg/L)		140	125	100	150	130	120
		130	125	130	90	100	120
	267	135	125	115	120	115	120
COD (mg/L)		565	517	492	443	395	420
		588	517	468	443	420	395
	646	577	517	480	443	408	408
PVA (mg/L)		278	278	227	201	175	150
		303	303	252	175	175	175
	400	291	291	240	188	175	163

ตารางที่ ก-2.1.3 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 600 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	24	6	5	4	4	4	4
Permeate flux (cm/min)	0.455	0.114	0.095	0.076	0.076	0.076	0.076
Pressure (bar)	2	2.3	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8
pH	5.69	5.36	5.4	5.42	5.31	5.25	5.11
Turbidity (NTU)	0.4	0.21	0.19	0.21	0.18	0.18	0.18
TDS (mg/L)		150	160	160	140	100	90
		190	180	130	100	90	60
	340	170	170	145	120	95	75
COD (mg/L)		561	488	415	488	342	415
		633	561	415	342	342	342
	1046	597	525	415	415	342	379
PVA (mg/L)		355	278	252	175	175	150
		329	278	227	201	150	175
	600	342	278	240	188	163	163

ตารางที่ ก-2.1.4 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 800 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	28	4.5	4	3.5	3	3	3
Permeate flux (cm/min)	0.53	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06
Pressure (bar)	2	2.3	2.5	2.55	2.65	2.8	2.8
pH	5.9	5.7	5.43	5.38	5.27	5.23	5.2
Turbidity (NTU)	0.38	0.18	0.17	0.17	0.16	0.13	0.13
TDS (mg/L)		240	220	240	170	120	90
		240	220	220	150	80	80
	590	240	220	230	160	100	85
COD (mg/L)		488	342	415	415	269	269
		561	415	342	342	342	269
	1434	525	379	379	379	306	269
PVA (mg/L)		175	150	150	124	98	98
		201	175	150	124	124	124
	800	188	163	150	124	111	111

ตารางที่ ก-2.1.5 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	18	5.5	4.5	3.5	3	3	3
Permeate flux (cm/min)	0.342	0.104	0.085	0.066	0.057	0.057	0.057
Pressure (bar)	2	2.3	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7
pH	5.8	5.8	5.75	5.62	5.59	5.57	5.49
Turbidity (NTU)	0.58	0.5	0.38	0.38	0.29	0.3	0.29
TDS (mg/L)		400	300	300	300	100	100
		400	500	400	200	200	100
	650	400	400	350	250	150	100
COD (mg/L)		1500	1125	1125	750	750	375
		1125	750	750	750	750	375
	1625	1313	938	938	750	750	375
PVA (mg/L)		623	510	397	368	368	340
		623	482	482	453	340	340
	1000	623	496	440	411	354	340

ตารางที่ ก-2.1.6 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 800 mg/L ที่ความดัน 0.5 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240
Flow (ml/min.)	8.5	5.5	5	4.5	4.5	4.5
Permeate flux (cm/min)	0.161	0.104	0.095	0.085	0.085	0.085
Pressure (bar)	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.7
pH	5.9	5.79	5.71	5.68	5.79	5.67
Turbidity (NTU)	0.38	0.18	0.16	0.13	0.1	0.09
TDS (mg/L)		366.67	266.67	333.33	166.67	166.67
		266.67	266.67	166.67	266.67	133.33
	590	317	267	250	217	150
COD (mg/L)		731.80	495.73	495.73	417.05	417.05
		731.80	495.73	417.05	417.05	417.05
	1434	732	496	456	417	417
PVA (mg/L)		324.80	304.80	184.80	144.80	124.80
		404.80	244.80	164.80	144.80	144.80
	800	365	275	175	145	135

ตารางที่ ก-2.1.7 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 800 mg/L ที่ความดัน 1 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300	360
Flow (ml/min.)	10	4	4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Permeate flux (cm/min)	0.19	0.076	0.076	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
Pressure (bar)	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
pH	5.9	5.52	5.4	5.32	5.15	5.25	5.17	5.23
Turbidity (NTU)	0.38	0.35	0.26	0.22	0.19	0.17	0.14	0.13
TDS (mg/L)		266.67	266.67	266.67	133.33	166.67	133.33	133.33
		366.67	266.67	233.33	233.33	200.00	133.33	133.33
	590	317	267	250	183	183	133	133
COD (mg/L)		574.42	495.73	495.73	417.05	417.05	417.05	417.05
		574.42	574.42	417.05	495.73	417.05	417.05	417.05
	1434	574	535	456	456	417	417	417
PVA (mg/L)		324.47	301.21	234.70	234.70	231.44	231.44	208.19
		324.47	231.44	277.95	277.95	208.19	208.19	208.19
	800	324	266	256	256	220	220	208

ตารางที่ ก-2.1.8 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 800 mg/L ที่ความดัน 1.5 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	12	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Permeate flux (cm/min)	0.223	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
Pressure (bar)	1.5	1.6	1.7	1.8	2	2.1	2.1
pH	5.9	5.75	5.72	5.67	5.62	5.66	5.54
Turbidity (NTU)	0.38	0.14	0.19	0.16	0.13	0.14	0.14
TDS (mg/L)		100	233.33	100	66.67	33.33	33.33
		200	166.67	100	66.67	66.67	66.67
	590	150	200	100	67	50	50
COD (mg/L)		495.73	417.05	338.36	338.36	338.36	338.36
		417.05	338.36	417.05	338.36	338.36	417.05
	1434	456	378	378	338	338	378
PVA (mg/L)		208.19	231.44	208.19	208.19	161.67	161.67
		208.19	208.19	184.93	161.67	208.19	161.67
	800	208	220	197	185	185	162

ก-2.2 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในน้ำเสียพีวีเอสังเคราะห์ขนาดรูพรุน 150 kDa

ตารางที่ ก-2.2.1 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอที่ความเข้มข้น 200 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (mL/min.)	6.5	5	5	4.5	4.5	4.5	4.5
Permeate flux (cm/min)	0.1	0.1	0.1	0.09	0.09	0.09	0.1
Pressure (bar)	2	2.2	2.4	2.6	2.7	2.8	2.8
pH	5.8	5.34	5.2	5.15	5.16	5.07	5
Turbidity (NTU)	0.2	0.12	0.1	0.1	0.09	0.08	0.1
TDS (mg/L)		60	50	40	40	40	40
		50	40	40	20	20	20
	250	55	45	40	30	30	30
COD (mg/L)		30.64	30.64	30.64	30.64	30.64	30.6
		30.64	30.64	30.64	30.64	30.64	30.6
	310	31	31	31	31	31	31
PVA (mg/L)		39.11	39.11	39.11	39.11	39.11	39.1
		39.11	39.11	39.11	39.11	39.11	39.1
	200	39	39	39	39	39	39

ตารางที่ ก-2.2.2 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอที่ความเข้มข้น 400 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (mL/min.)	5	4	4	4	4	3.5	3.5
Permeate flux (cm/min)	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07
Pressure (bar)	2	2.2	2.3	2.5	2.6	2.7	2.7
pH	5.74	5.56	5.58	5.31	5.47	5.52	5.69
Turbidity (NTU)	0.34	0.19	0.08	0.09	0.1	0.09	0.1
TDS (mg/L)		60	60	40	40	30	40
		70	40	30	30	30	30
	267	65	50	35	35	30	35
COD (mg/L)		137.9	137.9	137.9	122.6	107.3	107.3
		122.6	122.6	137.9	137.9	137.9	107.3
	646	130	130	138	130	123	107
PVA (mg/L)		39.11	39.11	39.11	39.11	39.11	39.11
		39.11	39.11	39.11	39.11	39.11	39.11
	400	39	39	39	39	39	39

ตารางที่ ก-2.2.3 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 600 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Permeate flux (cm/min)	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Pressure (bar)	2	2.3	2.45	2.6	2.7	2.8	2.8
pH	5.69	5.39	5.23	5.23	5.32	5.4	5.35
Turbidity (NTU)	0.4	0.12	0.1	0.11	0.1	0.1	0.11
TDS (mg/L)		80	80	60	50	40	40
		70	80	50	40	40	40
	340	75	80	55	45	40	40
COD (mg/L)		195.8	161.1	161.1	161.1	161.1	126.8
		195.8	161.1	126.8	161.1	161.1	126.8
	1046	196	161	144	161	161	127
PVA (mg/L)		131.8	131.8	100.3	100.3	68.87	68.87
		131.8	131.8	100.3	100.3	68.87	68.87
	600	132	132	100	100	69	69

ตารางที่ ก-2.2.4 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอที่ความเข้มข้น 800 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	5	4.5	3	3	3	3	3
Permeate flux (cm/min)	0.1	0.085	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057
Pressure (bar)	2	2.3	2.4	2.6	2.65	2.7	2.7
pH	5.9	5.37	5.28	5.14	5.09	5.05	5.03
Turbidity (NTU)	0.38	0.16	0.12	0.11	0.1	0.1	0.1
TDS (mg/L)		50	50	50	40	40	40
		80	50	40	40	20	20
	590	65	50	45	40	30	30
COD (mg/L)		274.3	274.2	137.1	137.1	137.1	137.1
		411.4	137.1	137.1	137.1	137.1	137.1
	1434	343	206	137	137	137	137
PVA (mg/L)		164.17	141.50	141.50	141.50	141.50	141.50
		141.50	141.50	164.17	141.50	141.50	141.50
	800	153	142	153	142	142	142

ตารางที่ ก-2.2.4 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอที่ความเข้มข้น 1000 mg/L ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (mL/min.)	5	3.5	3	3	3	3	3
Permeate flux (cm/min)	0.095	0.066	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057
Pressure (bar)	2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6
pH	5.9	5.46	5.35	5.33	5.28	5.19	5.05
Turbidity (NTU)	0.58	0.26	0.11	0.1	0.09	0.11	0.12
TDS (mg/L)		100	80	40	40	40	10
		50	50	50	20	20	20
		650	75	65	45	30	30
COD (mg/L)		277.24	137.12	137.12	137.12	137.12	137.12
		277.24	137.12	137.12	137.12	137.12	137.12
		1625	277	137	137	137	137
PVA (mg/L)		164.17	118.82	141.50	141.50	118.82	118.82
		164.17	186.85	141.50	141.50	141.50	141.50
		1000	164	153	142	142	130

ก-3.1 กระบวนการร่วมโคแอกกูเลชัน-อัลตราฟิลเตรชันในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง
 ตารางที่ ก-3.1.1 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวีเอด้วยขนาดรูพรุน 150 kDa ที่ความดัน 0.5 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240
Flow (ml/min.)	1.8	1.2	1	0.8	0.8	0.6
Permeate flux (cm/min)	0.03	0.023	0.019	0.015	0.015	0.011
Pressure (bar)	0.5	0.6	0.6	0.65	0.7	0.7
pH	9.89	9.33	9.42	9.5	9.48	9.37
Turbidity (NTU)	120	0.91	0.34	0.36	0.34	0.35
TDS (mg/L)		7900	8100	6400	6300	6600
		7600	7500	6000	6900	6300
	7967	7750	7800	6200	6600	6450
COD (mg/L)		4056.96	3718.88	4056.96	4395.04	4056.96
		3718.88	3718.88	3718.88	3718.88	4056.96
	7882	3888	3719	3888	4057	4057
PVA (g/L)		0.98	0.82	0.67	0.62	0.64
		1.26	1.03	0.75	0.67	0.60
	3.4	1.12	0.93	0.71	0.65	0.62

ตารางที่ ก-3.1.2 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวีเอด้วยขนาดรูพรุน 150 kDa ที่ความดัน 1 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300	360
Flow (ml/min.)	2.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2
Permeate flux (cm/min)	0.05	0.027	0.027	0.027	0.023	0.023	0.023	0.023
Pressure (bar)	1	1.05	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5
pH	9.89	9.55	9.64	9.6	9.58	9.49	9.53	9.55
Turbidity (NTU)	120	0.67	0.37	0.31	0.31	0.29	0.27	0.27
TDS (mg/L)		6600	6400	6300	6200	7400	6400	6200
		6300	6900	6500	6900	7100	6900	6400
	7967	6450	6650	6400	6550	7250	6650	6300
COD (mg/L)		3941.08	3582.80	3941.08	3582.80	3941.08	3941.08	3582.80
		3582.80	3582.80	3582.80	3941.08	4299.36	3582.80	3582.80
	7882	3762	3583	3762	3762	4120	3762	3583
PVA (g/L)		0.61	0.34	0.34	0.29	0.34	0.32	0.29
		0.57	0.36	0.42	0.29	0.29	0.29	0.29
	3.4	0.59	0.35	0.38	0.29	0.32	0.31	0.29

ตารางที่ ก-3.1.3 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวีเอด้วยขนาดรูพรุน 150 kDa ที่ความดัน 1.5 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (mL/min.)	3	2.5	2	1.6	1.2	1.2	1.2
Permeate flux (cm/min)	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.023
Pressure (bar)	1.5	1.75	1.8	2.1	2.2	2.4	2.4
pH	9.89	9.36	9.43	9.37	9.41	9.47	9.38
Turbidity (NTU)	120	0.85	0.52	0.5	0.59	0.6	0.51
TDS (mg/L)		5800	6800	4400	4800	4650	5300
		6100	6300	4400	4800	4900	5400
	7967	5950	6550	4400	4800	4775	5350
COD (mg/L)		3404	3762	3762	3045	3045	3045.38
		3404	3762	3404	3404	3404	3403.66
	7882	3404	3762	3583	3225	3225	3225
PVA (g/L)		0.47	0.23	0.14	0.14	0.11	0.14
		0.32	0.17	0.14	0.14	0.17	0.11
	3.4	0.4	0.2	0.14	0.14	0.14	0.13

ตารางที่ ก-3.1.4 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวีเอด้วยขนาดรูพรุน 150 kDa ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (mL/min.)	3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Permeate flux (cm/min)	0.057	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
Pressure (bar)	2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7
pH	9.89	9.22	9.17	9.14	9.25	9.15	9.23
Turbidity (NTU)	120	0.85	0.53	0.51	0.46	0.47	0.44
TDS (mg/L)		5100	4900	5000	5700	5700	5400
		5600	5400	5000	5700	5400	5400
	7967	5350	5150	5000	5700	5550	5400
COD (mg/L)		3404	3404	3404	3404	3045	3045.38
		3404	3404	3762	3045	3045	3045.38
	7882	3404	3404	3583	3225	3045	3045
PVA (g/L)		0.17	0	0	0	0	0
		0.08	0	0	0	0	0
	3.4	0.13	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-3.1.5 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอด้วยขนาดรูพรุน 300 kDa ที่ความดัน 0.5 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240
Flow (ml/min.)	4.2	1.2	1.2	1	0.8	0.8
Permeate flux (cm/min)	0.08	0.023	0.023	0.019	0.015	0.015
Pressure (bar)	0.5	0.6	0.65	0.7	0.8	0.8
pH	9.89	9.35	9.32	9.3	9.41	9.37
Turbidity (NTU)	120	2.23	0.41	0.32	0.29	0.32
TDS (mg/L)		7800	6500	7000	6900	7100
		8500	6500	7700	7400	6500
	7967	8150	6500	7350	7150	6800
COD (mg/L)		5409.28	4395.04	3718.88	3718.88	3380.80
		5071.20	4056.96	3718.88	3718.88	3718.88
	7882	5240	4226	3719	3719	3550
PVA (g/L)		1.58	1.11	0.83	0.79	0.69
		1.62	1.03	0.88	0.77	0.73
	3.4	1.6	1.07	0.86	0.78	0.71

ตารางที่ ก-3.1.6 ผลการทดลองการกำจัดสารฟิวเอด้วยขนาดรูพรุน 300 kDa ที่ความดัน 1 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240
Flow (ml/min.)	4.4	1	1	0.8	0.6	0.6
Permeate flux (cm/min)	0.08	0.019	0.019	0.015	0.011	0.011
Pressure (bar)	1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
pH	9.89	9.05	9.1	9.06	9.01	9.06
Turbidity (NTU)	120	1.41	0.35	0.36	0.33	0.36
TDS (mg/L)		8100	7400	7300	7500	6600
		8200	7500	7700	7500	7100
	7967	8150	7450	7500	7500	6850
COD (mg/L)		4696.38	4000.62	4384.50	4384.50	4000.62
		4696.38	4000.62	4000.62	4000.62	4000.62
	7882	4696	4001	4193	4193	4001
PVA (g/L)		1.31	0.6	0.49	0.34	0.34
		1.19	0.62	0.43	0.41	0.36
	3.4	1.25	0.61	0.46	0.38	0.35

ตารางที่ ก-3.1.7 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอด้วยขนาดรูพรุน 300 kDa ที่ความดัน 1.5 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	5	1.2	1	1	0.6	0.6	0.6
Permeate flux (cm/min)	0.095	0.023	0.019	0.019	0.011	0.011	0.011
Pressure (bar)	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2
pH	9.89	9.09	9.25	9.27	9.18	9.18	9.25
Turbidity (NTU)	120	1.42	0.45	0.37	0.43	0.54	0.56
TDS (mg/L)		6100	6600	6400	5700	5200	4500
		5400	6100	5900	5800	6100	5000
	7967	5750	6350	6150	5750	5650	4750
COD (mg/L)		4000.62	4000.62	3652.74	4000.62	3652.74	3652.74
		4384.50	4384.50	4384.50	4000.62	4000.62	4000.62
	7882	4193	4193	4019	4001	3827	3827
PVA (g/L)		0.61	0.37	0.37	0.35	0.35	0.35
		0.53	0.37	0.35	0.32	0.32	0.32
	3.4	0.57	0.37	0.36	0.34	0.34	0.34

ตารางที่ ก-3.1.8 ผลการทดลองการกำจัดสารพีวีเอด้วยขนาดรูพรุน 300 kDa ที่ความดัน 2 bar

เวลาเดินระบบ (min)	0	30	60	120	180	240	300
Flow (ml/min.)	5	2.5	2.5	2	2	2	2
Permeate flux (cm/min)	0.095	0.047	0.047	0.038	0.038	0.038	0.038
Pressure (bar)	2	2.1	2.2	2.5	2.6	2.7	2.7
pH	9.89	9.43	9.42	9.36	9.33	9.25	9.15
Turbidity (NTU)	120	0.56	0.46	0.39	0.37	0.38	0.4
TDS (mg/L)		6967	8333	7600	7133	6900	3400
		7133	7600	7133	6900	6900	3500
	7967	7050	7967	7367	7017	6900	3450
COD (mg/L)		4658	3045	3045	3404	3045	3761.94
		3404	3404	3762	3045	3045	3403.66
	7882	4031	3225	3404	3225	3045	3583
PVA (g/L)		0.6	0.32	0.21	0.22	0.17	0.15
		0.6	0.34	0.22	0.17	0.15	0.17
	3.4	0.6	0.33	0.22	0.2	0.16	0.16



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

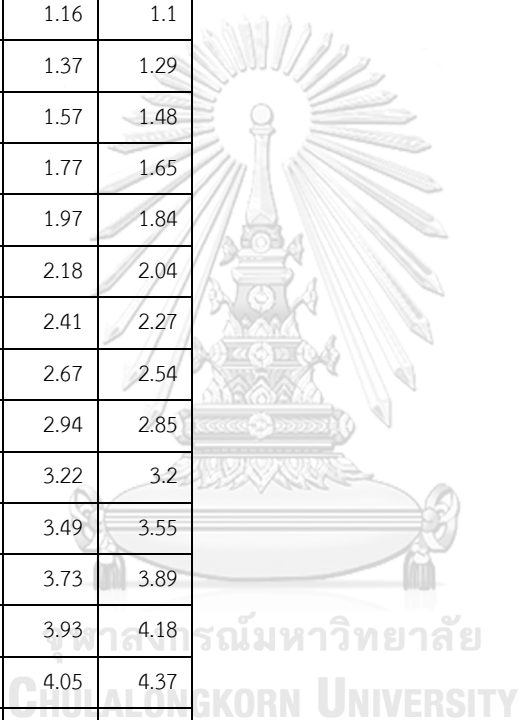
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง

Size (um)	% Vol. ln 1	% Vol. ln 2	% Vol. ln 3	Size (um)	% Vol. ln 1	% Vol. ln 2	% Vol. ln 3
0.01	0	0	0	0.767	0.28	0.3	0.29
0.0114	0	0	0	0.872	0.29	0.3	0.29
0.0129	0	0	0	0.991	0.23	0.24	0.24
0.0147	0	0	0	1.13	0.15	0.16	0.16
0.0167	0	0	0	1.28	0.1	0.1	0.1
0.0189	0	0	0	1.45	0.09	0.09	0.09
0.0215	0	0	0	1.65	0.14	0.15	0.14
0.0244	0	0	0	1.88	0.26	0.27	0.26
0.0278	0	0	0	2.13	0.45	0.47	0.45
0.0315	0	0	0	2.42	0.69	0.72	0.7
0.0358	0	0	0	2.75	0.99	1.04	1.01
0.0407	0	0	0	3.12	1.33	1.4	1.36
0.0463	0	0	0	3.55	1.69	1.78	1.72
0.0526	0	0	0	4.03	2.01	2.12	2.05
0.0597	0	0	0	4.58	2.25	2.37	2.3
0.0679	0	0	0	5.21	2.36	2.49	2.41
0.0771	0	0	0	5.92	2.33	2.45	2.37
0.0876	0	0	0	6.72	2.16	2.27	2.19
0.0995	0	0	0	7.64	1.9	1.98	1.91
0.113	0	0	0	8.68	1.58	1.64	1.57
0.128	0	0	0	9.86	1.27	1.31	1.24
0.146	0	0	0	11.2	1	1.02	0.96
0.166	0	0	0	12.7	0.81	0.81	0.75
0.188	0	0	0	14.5	0.68	0.68	0.62
0.214	0	0	0	16.4	0.62	0.62	0.56
0.243	0	0	0	18.7	0.6	0.6	0.55
0.276	0	0	0	21.2	0.6	0.6	0.55
0.314	0	0	0	24.1	0.59	0.59	0.55
0.357	0	0	0	27.4	0.56	0.57	0.54
0.405	0	0	0	31.1	0.52	0.53	0.5
0.46	0	0	0	35.3	0.47	0.48	0.46

Size (um)	% Vol. ln 1	% Vol. ln 2	% Vol. ln 3
40.1	0.43	0.44	0.41
45.6	0.4	0.41	0.39
51.8	0.42	0.42	0.4
58.9	0.48	0.48	0.46
66.9	0.59	0.6	0.56
76	0.75	0.76	0.72
86.4	0.93	0.95	0.9
98.1	1.14	1.16	1.1
111	1.34	1.37	1.29
127	1.53	1.57	1.48
144	1.72	1.77	1.65
163	1.91	1.97	1.84
186	2.12	2.18	2.04
211	2.37	2.41	2.27
240	2.64	2.67	2.54
272	2.95	2.94	2.85
310	3.29	3.22	3.2
352	3.64	3.49	3.55
400	3.98	3.73	3.89
454	4.28	3.93	4.18
516	4.51	4.05	4.37
586	4.64	4.08	4.42
666	4.62	4	4.32
756	4.43	3.8	4.09
859	4.07	3.51	3.73
976	3.56	3.14	3.29
1110	2.94	2.71	2.81
1260	2.26	2.24	2.31
1430	1.58	1.77	1.82

Size (um)	% Vol. ln 1	% Vol. ln 2	% Vol. ln 3
1630	0.91	1.33	1.38
1850	0.23	0.95	0.99
2100	0	0.65	0.68
2390	0	0.43	0.45
2710	0	0.26	0.27
3080	0	0.12	0.13
3500	0	0	0



ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเสียกระบวนการลอกแป้ง
หลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน

Size (um)	% Vol. In 1	% Vol. In 2	% Vol. In 3
0.01	0	0	0
0.0114	0	0	0
0.0129	0	0	0
0.0147	0	0	0
0.0167	0	0	0
0.0189	0	0	0
0.0215	0	0	0
0.0244	0	0	0
0.0278	0	0	0
0.0315	0	0	0
0.0358	0	0	0
0.0407	0	0	0
0.0463	0	0	0
0.0526	0	0	0
0.0597	0	0	0
0.0679	0	0	0
0.0771	0	0	0
0.0876	0	0	0
0.0995	0	0	0
0.113	0	0	0
0.128	0	0	0
0.146	0	0	0
0.166	0	0	0
0.188	0	0	0
0.214	0	0	0
0.243	0	0	0
0.276	0	0	0
0.314	0	0	0
0.357	0	0	0
0.405	0	0	0

Size (um)	% Vol. In 1	% Vol. In 2	% Vol. In 3
0.46	0	0	0
0.523	0.44	0.44	0.44
0.594	1.09	1.1	1.1
0.675	1.73	1.74	1.74
0.767	2.1	2.1	2.1
0.872	2.09	2.09	2.09
0.991	1.8	1.8	1.8
1.13	1.43	1.44	1.43
1.28	1.18	1.18	1.18
1.45	1.12	1.13	1.13
1.65	1.26	1.26	1.27
1.88	1.53	1.53	1.53
2.13	1.88	1.88	1.88
2.42	2.31	2.31	2.31
2.75	2.86	2.87	2.87
3.12	3.61	3.61	3.61
3.55	4.56	4.57	4.57
4.03	5.67	5.68	5.68
4.58	6.76	6.77	6.77
5.21	7.63	7.64	7.64
5.92	8.07	8.09	8.09
6.72	7.96	7.98	7.99
7.64	7.3	7.31	7.32
8.68	6.17	6.18	6.2
9.86	4.79	4.8	4.82
11.2	3.38	3.39	3.4
12.7	2.14	2.14	2.16
14.5	1.2	1.2	1.2
16.4	0.59	0.59	0.6
18.7	0.3	0.3	0.3

Size (um)	% Vol. In 1	% Vol. In 2	% Vol. In 3
21.2	0.23	0.23	0.22
24.1	0.28	0.28	0.28
27.4	0.38	0.38	0.37
31.1	0.46	0.46	0.45
35.3	0.5	0.5	0.5
40.1	0.5	0.5	0.5
45.6	0.48	0.48	0.48
51.8	0.46	0.45	0.45
58.9	0.44	0.43	0.44
66.9	0.45	0.44	0.43
76	0.47	0.45	0.45
86.4	0.49	0.47	0.46
98.1	0.49	0.48	0.46
111	0.46	0.44	0.43
127	0.39	0.37	0.35
144	0.29	0.27	0.26
163	0.18	0.17	0.16
186	0.1	0.09	0.08
211	0	0	0
240	0	0	0
272	0	0	0
310	0	0	0
352	0	0	0
400	0	0	0
454	0	0	0
516	0	0	0
586	0	0	0

Size (um)	% Vol. In 1	% Vol. In 2	% Vol. In 3
666	0	0	0
756	0	0	0
859	0	0	0
976	0	0	0
1110	0	0	0
1260	0	0	0
1430	0	0	0
1630	0	0	0
1850	0	0	0
2100	0	0	0
2390	0	0	0
2710	0	0	0
3080	0	0	0
3500	0	0	0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชาญชนะ จิตตะโสภี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และ
เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557

