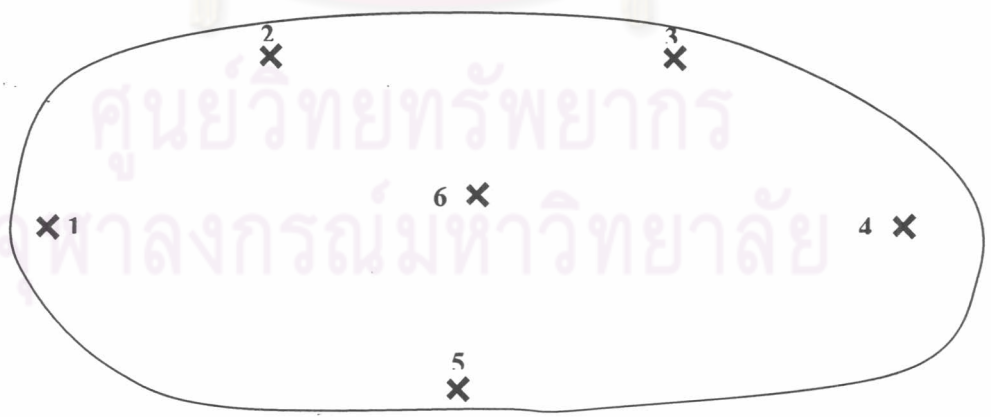
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในเขื่อนลำตะคอง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากเขื่อนลำตะคองในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2546 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2546 และเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547 และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) คลอไรด์ ซัลเฟต ซีโอดี ฟลูออไรด์ แมงกานีส เซลิเนียม ปรอท สารหนู อี.โคไล (*E.coli*) และโคลิฟอร์มแบคทีเรีย โดยเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 6 จุด บริเวณกึ่งกลางความลึก ดังรูปที่ 4.1 ได้แก่

1. ริมสันเขื่อนลำตะคอง
2. จุดสูบน้ำเพื่อการประปา
3. มอปลาย่างใหม่
4. ปากคลองลำตะคอง
5. สถานีรถไฟ
6. กึ่งกลางเขื่อนลำตะคอง



รูปที่ 4.1 แผนที่โดยสังเขปแสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำในเขื่อนลำตะคอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำในเขื่อนลำตะคอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ม.ค. 2546	พ.ย. 2546	ก.พ. 2547
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	มก./ล.	126.33-198.67	80.20-162.67	-
คลอไรด์	มก./ล.	10.33-12.00	9.54-11.00	-
ซัลเฟต	มก./ล.	3.53-4.27	3.94-3.84	-
ฟลูออไรด์	มก./ล.	0.3-0.5	-	-
เซลิเนียม	มก./ล.	0.001	-	-
ปรอท	มก./ล.	N.D.	-	-
สารหนู	มก./ล.	N.D.	-	-
อี. โคไล (E.coli)	เอ็มพีเอ็น/100 มล.	-	-	-
ซีโอดี	มก./ล.	76.8-320.4	47.06	69.99
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย	เอ็มพีเอ็น/100 มล.	-	20	11

หมายเหตุ N.D. (Non-detectable) หมายถึง ไม่สามารถตรวจวัดได้

4.2 การเตรียมเมมเบรนพอลิซัลโฟน

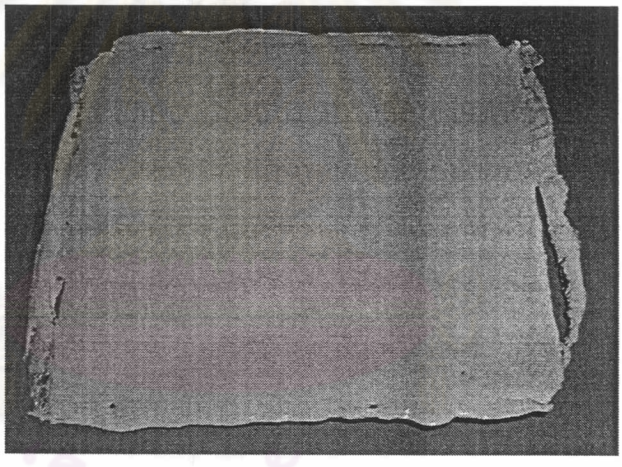
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่เตรียมได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.2 และมีความหนาอยู่ในช่วง 150-200 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่เตรียมได้ทั้งหมดมีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร ซึ่งเป็นลักษณะของเมมเบรนที่ต้องการเนื่องจากให้ฟลักซ์สูงและให้ค่าร้อยละการกักกันสูง โดยสามารถสังเกตได้ดังรูปที่ 4.3 ว่าเมมเบรนมีชั้นผิวเนื้อแน่นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของพอลิซัลโฟน โดยทั่วไปเมมเบรนที่มีชั้นผิวเนื้อแน่นเพิ่มขึ้นทำให้ฟลักซ์ลดลงแต่ค่าร้อยละการกักกันเพิ่มขึ้น ในเบื้องต้นจึงนำเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ไปทดสอบฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ จากการทดลองพบว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าฟลักซ์ลดลงมากกว่า 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 มาศึกษาลักษณะสมบัติต่อไป

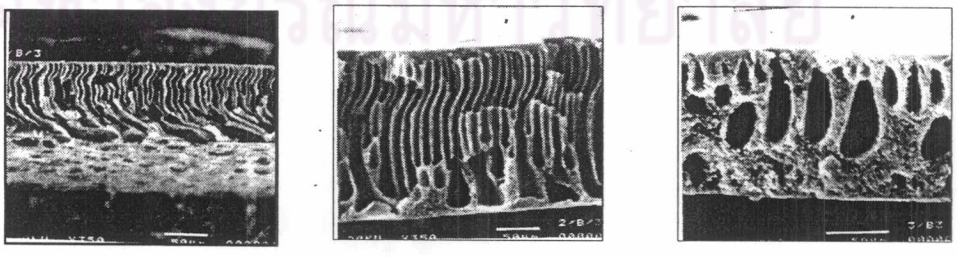
จากรูปที่ 4.4 เมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระเหยตัวทำละลายบางส่วนภายในตู้อบลมร้อนเกิดได้ทั้งโครงสร้างแบบรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (Sponge like

structure) และโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอก (Finger like structure) ขึ้นอยู่กับสภาวะในการเปลี่ยนเฟส ส่วนการระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบสุญญากาศทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอกทุกสภาวะ

เมื่อให้เวลาในการระเหยตัวทำละลายมากขึ้นพบว่า เมมเบรนมีชั้นผิวเนื้อแน่นและมีโครงสร้างแน่นขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำจาก 20ไปเป็น 4 องศาเซลเซียส พบว่าเมมเบรนมีชั้นเนื้อแน่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน โครงสร้างแบบไม่สมมาตรของเมมเบรนเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนเฟส ตัวทำละลายเกิดการระเหยที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนก่อน (ส่วนที่ไม่ติดกับกระจก) จากนั้นสายโซ่สั้นๆ ของพอลิซัลโฟนจึงเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นเกิดเป็นชั้นเนื้อแน่นที่ผิวหน้าเมมเบรน และเมื่อนำเมมเบรนแช่ลงในอ่างน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ตัวทำละลายสามารถแพร่ออกจากเมมเบรนสวนทางกับน้ำที่แพร่เข้าไปในเมมเบรน เกิดเป็นบริเวณที่มีเนื้อพอลิเมอร์มากและบริเวณที่มีเนื้อพอลิเมอร์น้อย เมื่อทำให้พอลิเมอร์แห้งจึงเกิดเป็นโครงสร้างรูพรุนภายในเมมเบรน

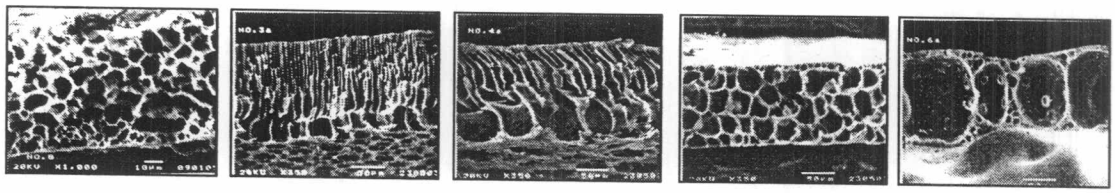


รูปที่ 4.2 ลักษณะของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่เตรียมได้



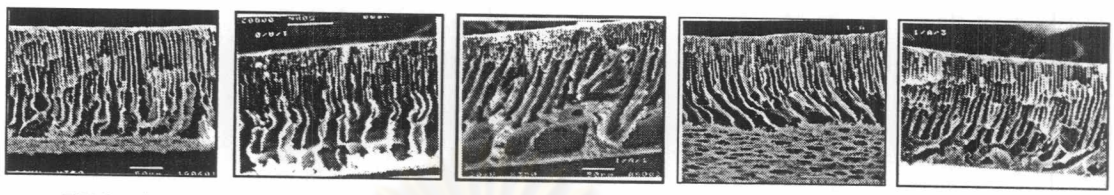
10% PSf 15% PSf 20% PSf

รูปที่ 4.3 เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่ระเหยตัวทำละลายบางส่วนภายในตู้อบสุญญากาศ เป็นเวลา 60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส



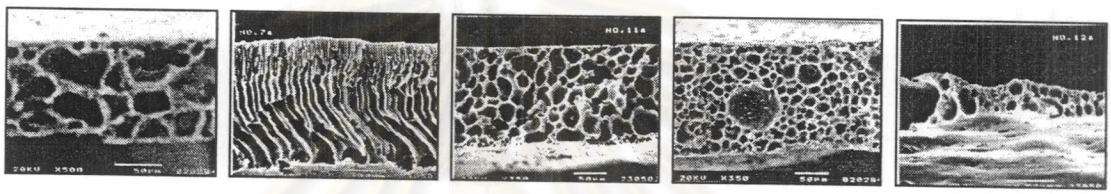
ET 3 min ET 5 min ET 15 min ET 30 min ET 60 min

(a) 10% PSf ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนที่ CT 20 °C



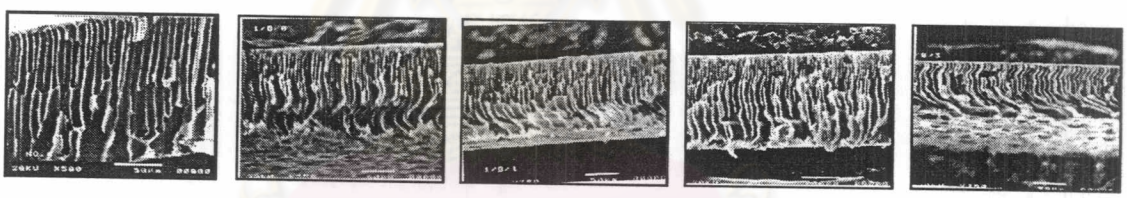
ET 3 min ET 5 min ET 15 min ET 30 min ET 60 min

(b) 10% PSf ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศที่ CT 20 °C



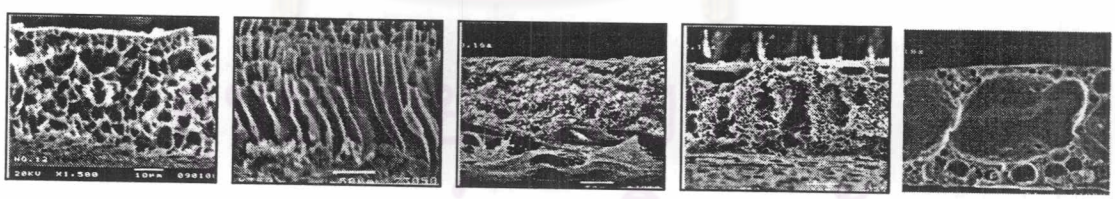
ET 3 min ET 5 min ET 15 min ET 30 min ET 60 min

(c) 10% PSf ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนที่ CT 10 °C



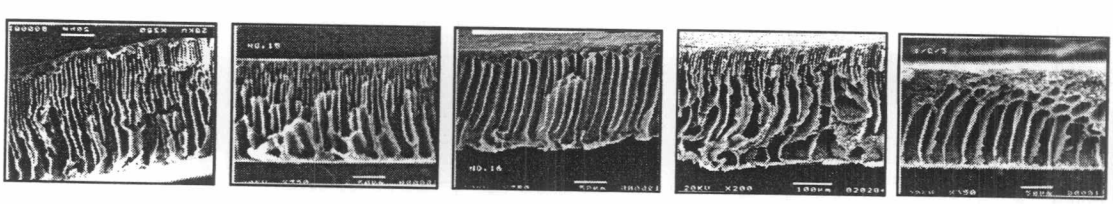
ET 3 min ET 5 min ET 15 min ET 30 min ET 60 min

(d) 10% PSf ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศที่ CT 10 °C



ET 3 min ET 5 min ET 15 min ET 30 min ET 60 min

(e) 10% PSf ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนที่ CT 4 °C



ET 3 min ET 5 min ET 15 min ET 30 min ET 60 min

(f) 10% PSf ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศที่ CT 4 °C

รูปที่ 4.4 ภาคตัดขวางของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

4.2.2 ผลการศึกษาฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

จากรูปที่ 4.5 เวลาในการระเหยตัวทำละลายไม่มีผลต่อค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนเมื่อให้เวลาในการระเหยตัวทำละลายมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิในอ่างน้ำลดลงจาก 20 ไปเป็น 10 และ 4 องศาเซลเซียส ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์กลับลดลงจาก 0.0263±0.0059 (ที่สภาวะ ET 3-60 นาที, CT 20 °C) ไปเป็น 0.0205±0.0032 (ที่สภาวะ ET 3-60 นาที, CT 10 °C) และ 0.0146±0.0032 ลิตร/นาที/ตารางเมตร/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ที่สภาวะ ET 3-60 นาที, CT 4 °C) ตามลำดับ ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ที่แตกต่างกันอาจเกิดจากผลของโครงสร้างรูพรุนในเมมเบรนที่มีทั้งแบบรูพรุนแบบทรงกระบอกและรูพรุนแบบฟองน้ำ ส่วนเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศพบว่า เวลาในการระเหยตัวทำละลาย หรืออุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำไม่มีผลต่อค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรน โดยทำให้เมมเบรนมีค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.0244±0.0046 ลิตร/นาที/ตารางเมตร/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะนี้เมมเบรนมีโครงสร้างเป็นรูพรุนแบบทรงกระบอกทั้งหมดจึงทำให้ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนไม่แตกต่างกัน ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์เป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานของเมมเบรนซึ่งจากการทดลองนี้พบว่า โครงสร้างรูพรุนของเมมเบรนส่งผลต่อความต้านทานของเมมเบรนอย่างเห็นได้ชัด

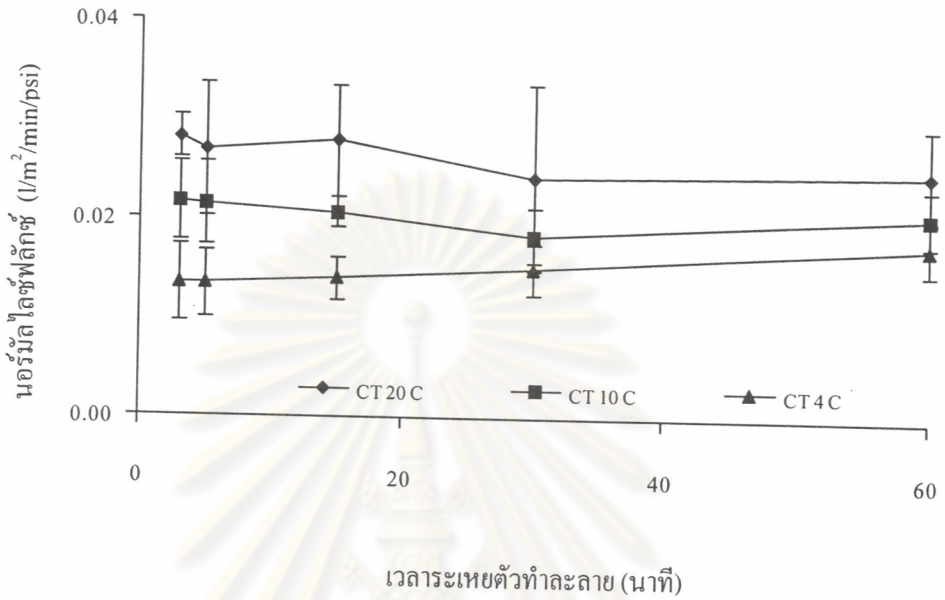
อย่างไรก็ตามจากการทดสอบค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์พบว่า เมมเบรนที่ให้ค่านอร์มัลไลซ์ ฟลักซ์สูงที่สุด คือ เมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 3-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยที่สภาวะนี้มีค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์เท่ากับ 0.0263±0.0059 ลิตร/นาที/ตารางเมตร/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

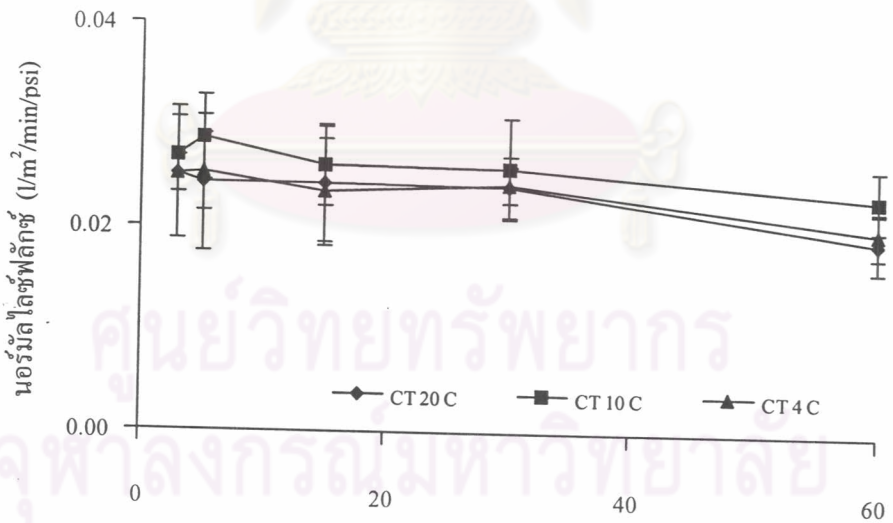
4.2.3 ผลการศึกษาค่า MWCO

จากรูปที่ 4.6 (a) และ (b) เมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนและตู้อบสุญญากาศสามารถกักกันสารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 47,000 ได้โดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.02±0.12 และ 95.07±0.14 ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีค่า MWCO เท่ากับ 47,000 การระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบลมร้อนหรือตู้อบสุญญากาศ เวลาในการระเหยตัวทำละลาย และอุณหภูมิในอ่างน้ำไม่มีผลต่อค่า MWCO จากลักษณะกราฟในรูปที่ 4.6 กล่าวได้ว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่เตรียมได้มีการกระจายขนาดของ

รูพรุนค่อนข้างกว้าง และขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเท่านั้น (เปรียบเทียบกับ Filtration spectrum รูปที่ 2.7)



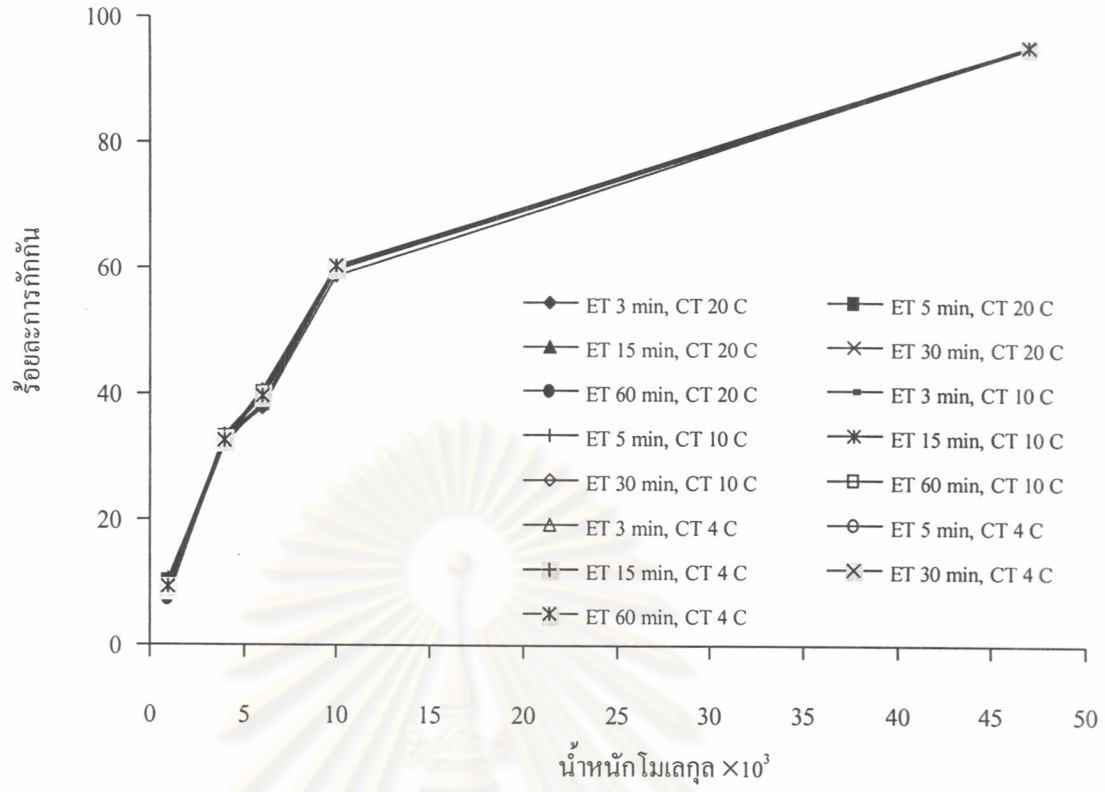
(a)



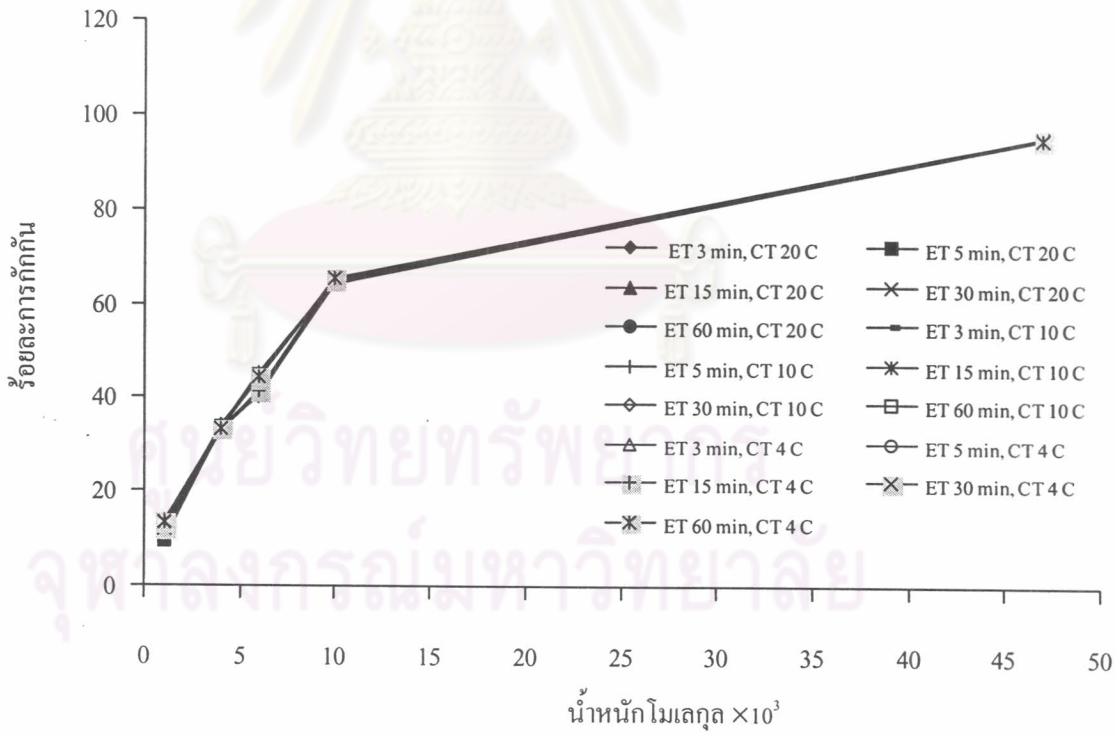
(b)

รูปที่ 4.5 ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
(a) เมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน
(b) เมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)

รูปที่ 4.6 MWCO ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
(a) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน 3-60 นาที และอุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส
(b) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ 3-60 นาที และอุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

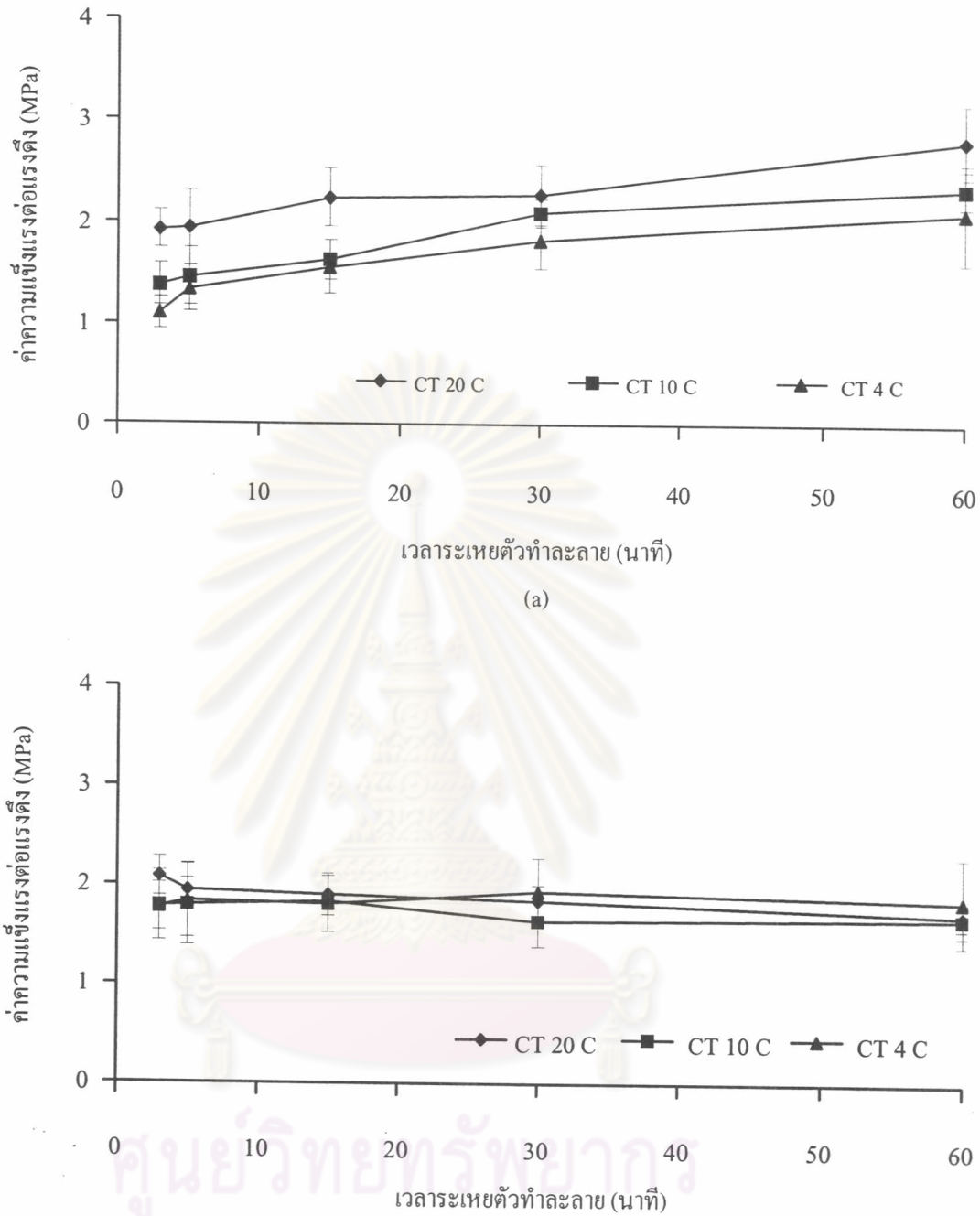
4.2.4 ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากรูปที่ 4.7 (a) และ (b) เวลาในการระเหยตัวทำละลายและอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนหรือตู้อบสุญญากาศ โดยเมมเบรนที่มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 2.33±0.45 เมกะปาสกาล คือ เมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำค่านี้มาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงโดยเฉลี่ยของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ พบว่ามีค่าต่ำกว่ามาก (เท่ากับ 1.83±0.27 เมกะปาสกาล) ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศมีโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ภายในเมมเบรนจึงทำให้เมมเบรนมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ

4.2.5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

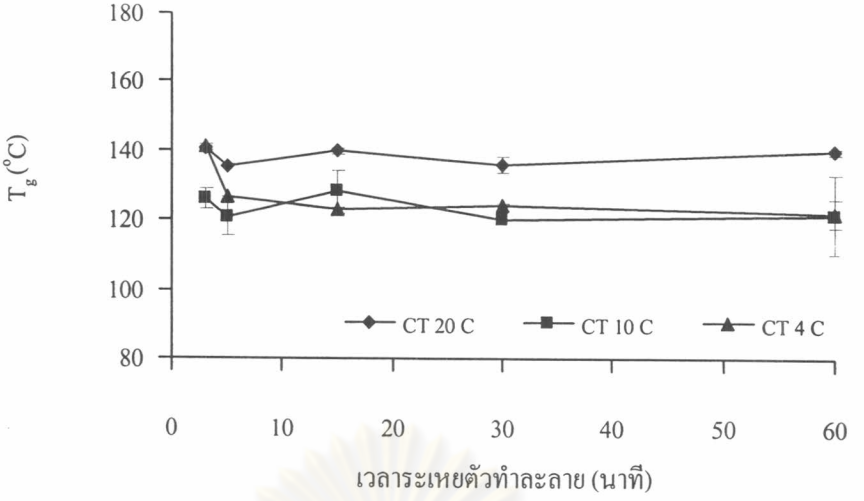
จากรูปที่ 4.8 (a) และ (b) แสดงว่าวิธีการระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนหรือตู้อบสุญญากาศมีผลต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรน แต่อุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำและเวลาในการระเหยตัวทำละลายไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรน เมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ โดยมีค่าเท่ากับ 129.6±8.4 และ 146.4±6.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ T_g ของเม็ดพอลิซัลโฟนมีค่าเท่ากับ 191.2 องศาเซลเซียส การที่เมมเบรนมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงเกิดจากเมมเบรนมีความเป็นผลึกลดลงสายโซ่พอลิเมอร์จึงเกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้มักทำให้ฟลักซ์ของเมมเบรนเพิ่มขึ้น แต่ค่าร้อยละการกักกันลดลง (รัตนา, 2543 และเสาวรจน์, 2545)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

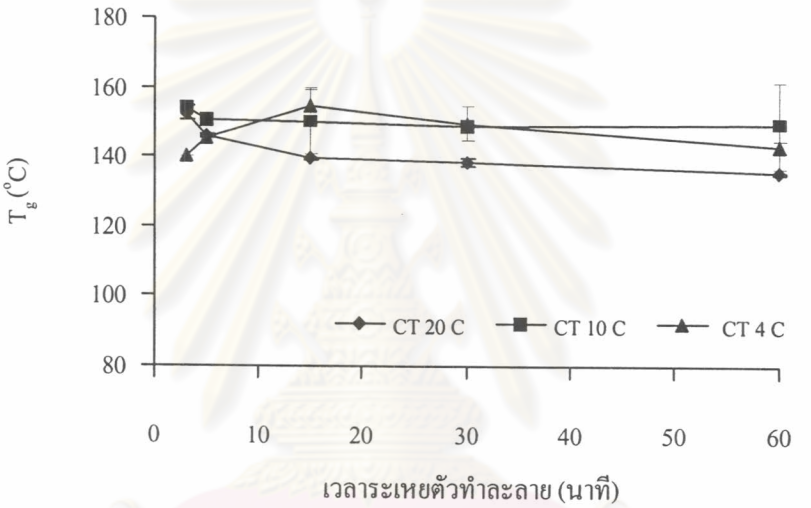


รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
(a) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน 3-60 นาที และอุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส
(b) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ 3-60 นาที และอุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)

รูปที่ 4.8 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

(a) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน 3-60 นาที อุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส

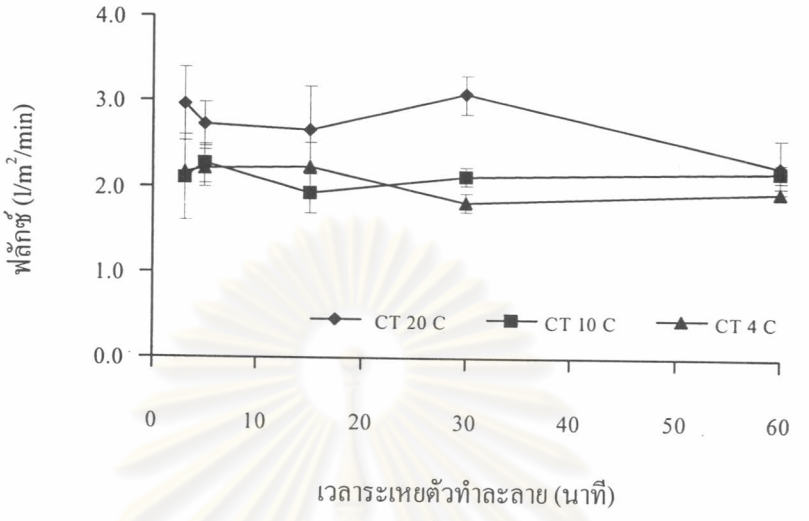
(b) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ 3-60 นาที อุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส

4.2.6 สมรรถนะของเมมเบรนในการบำบัดน้ำจากเขื่อนลำตะคอง

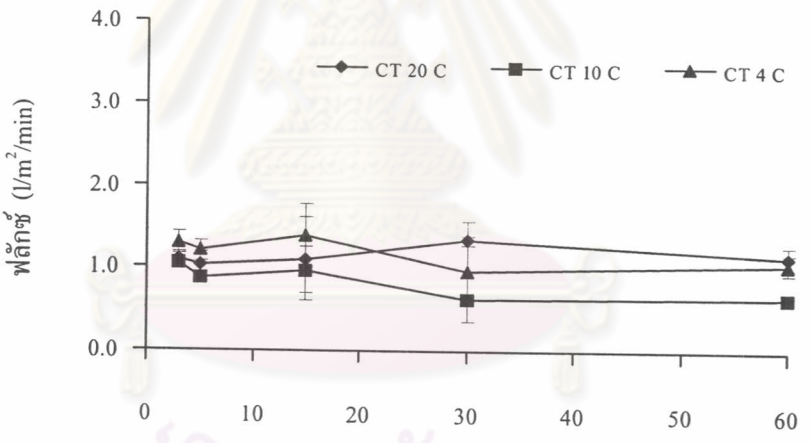
1. ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดิน

จากรูป 4.9 (a) และ (b) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนมีค่าฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ ดังนั้นสภาวะในการเตรียมเมมเบรนที่เหมาะต่อการนำไปบำบัดน้ำผิวดิน คือ เมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายในตู้อบ

ลมร้อนเป็นเวลา 3-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยที่สภาวะนี้ให้ค่าฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 2.74±0.43 ลิตร/ตารางเมตร/นาที



(a)



(b)

รูปที่ 4.9 ฟลักซ์การกรองน้ำผิวดินของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
(a) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน 3-60 นาที อุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส
(b) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ 3-60 นาที อุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส

2. ค่าร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียและซีโอดี

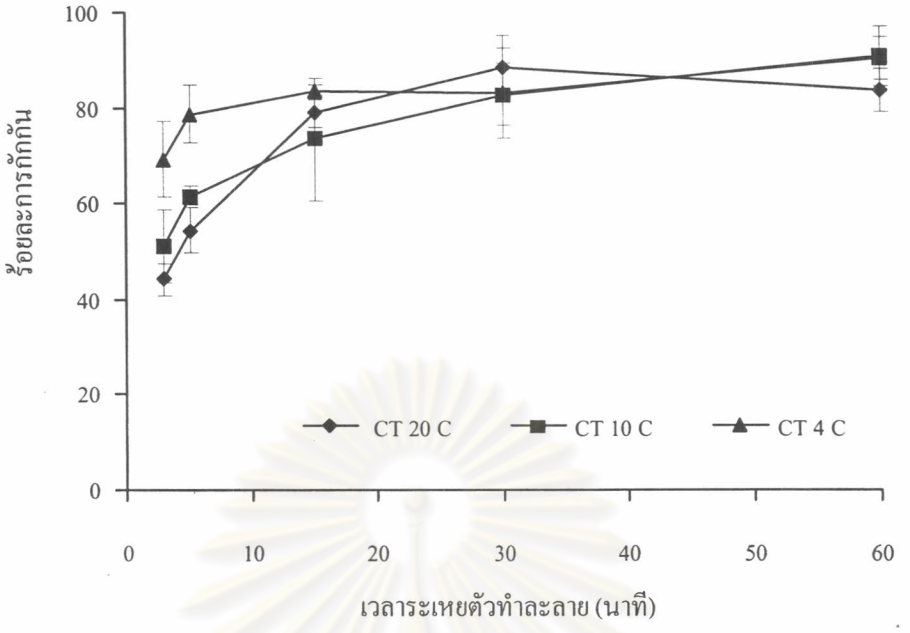
น้ำจากเขื่อนลำตะคองที่นำมาศึกษามีค่าโคลิฟอร์มแบคทีเรียเท่ากับ 20 เอ็มพีเอ็น/100 มิลลิลิตร และค่าซีโอดีเท่ากับ 47.06±3.01 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อให้คุณภาพน้ำที่ผ่านเมมเบรน

เหมาะสำหรับใช้เป็นน้ำดื่มต้องสามารถบำบัดให้มีค่าซีโอดีน้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร และตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำน้อยกว่า 2.2 เอ็มพีเอ็น/100 มิลลิลิตร กล่าวคือ ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนต้องมากกว่าร้อยละ 78

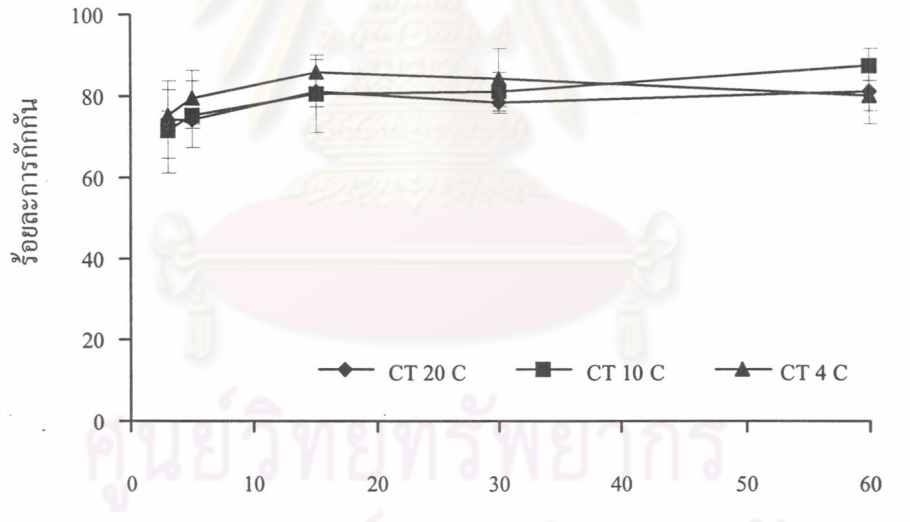
พบว่าค่าร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทุกสภาวะสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินได้ทั้งหมด หรือร้อยละ 100 โดยไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรนเลย แสดงว่าเมมเบรนที่เตรียมได้ทุกสูตรสามารถกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้อย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปขนาดของแบคทีเรียที่เล็กที่สุดมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.2 ไมโครเมตร (ณัฏฐพงศ์, 2543) และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของแบคทีเรียกับค่า MWCO 47,000 ของเมมเบรนที่ได้จากการทดลองพบว่าสอดคล้องกับความสามารถในการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (เปรียบเทียบกับ Filtration Spectrum รูปที่ 2.7)

จากรูปที่ 4.10 (a) และ (b) ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรน ที่ระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ให้ค่าการกักกันซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 83.72±5.90 อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าร้อยละการกักกันซีโอดีเฉลี่ยของเมมเบรนที่ระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 4-20 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 82.23±5.44 แต่เมื่อพิจารณาฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินที่มีค่าต่ำ และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ต่ำมากเช่นกัน (เฉลี่ย 1.83±0.27 เมกะปาสกาล) จึงทำให้เมมเบรนในสภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสำหรับนำมาบำบัดน้ำผิวดิน

กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีและโคลิฟอร์มแบคทีเรียอาจเกิดจากการติดค้างบนผิวเมมเบรนหรือการคัดขนาด (Sieving or size exclusion) และการเกาะติดกันเองของอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในน้ำดิบ น้ำในเขื่อนลำตะคองก่อนและหลังการบำบัดแสดงดังรูป 4.11 น้ำก่อนการบำบัดมีสีเหลืองขุ่นและมีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ แต่เมื่อนำมาบำบัดด้วยเมมบรนพอลิซัลโฟนพบว่าน้ำใสขึ้น และไม่มีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ



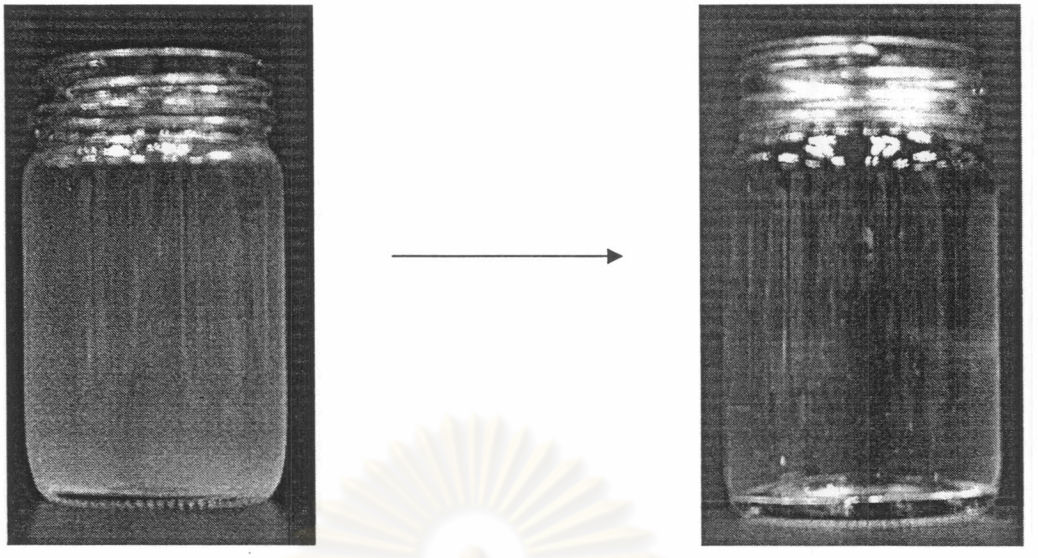
(a)



(b)

รูปที่ 4.10 ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
(a) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน 3-60 นาที อุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส
(b) ระเหยตัวทำละลายในตู้อบสุญญากาศ 3-60 นาที อุณหภูมิในอ่างน้ำ 4-20 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก่อนบำบัด

หลังบำบัด

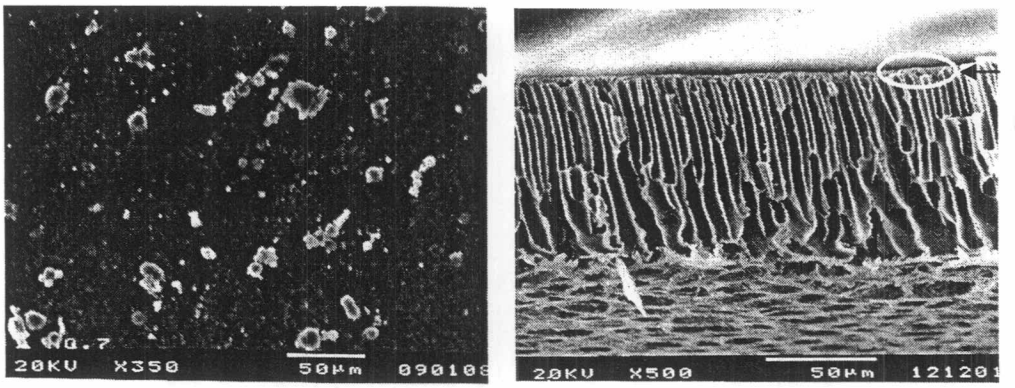
รูปที่ 4.11 น้ำในเขื่อนลำตะคองก่อนและหลังการบำบัด

จากการเตรียมเมมเบรนพอลิซัลโฟน สภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการเตรียม APSf membrane, SPSf membrane, PSf + SDS membrane, PSf + BC membrane และ PSf + TWEEN 80 membrane คือ เมมเบรนจากสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่มีการระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะดังกล่าวทำให้เมมเบรนพอลิซัลโฟนมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ 2.43±0.40 เมกะปาสกาล มีค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำผิวดินสูงเท่ากับ 2.67±0.48 ลิตร/ตารางเมตร/นาที สามารถกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ร้อยละ 100 และสามารถบำบัดซีโอดีให้มีค่าน้อยกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร เหมาะสมต่อการนำไปใช้บำบัดน้ำผิวดินให้เป็นน้ำดื่ม

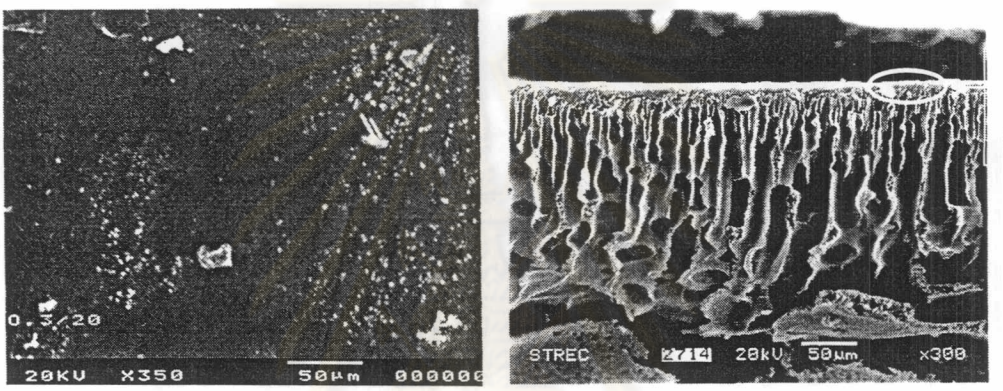
4.3 การเตรียมเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนและซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนและซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนมีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร ไม่พบรูพรุนที่บริเวณผิวหน้า และมีโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอก เช่นเดียวกับเมมเบรนพอลิซัลโฟน (ที่ ET 15 นาที, CT 20 °C) นอกจากนี้ยังพบว่ามีชั้นผิวเนื้อแน่นเกิดขึ้นชัดเจนกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่สภาวะเดียวกัน



รูปที่ 4.12 ลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน (ET 15 นาที, CT 20 °C)



รูปที่ 4.13 ลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน (ET 15 นาที, CT 20 °C)

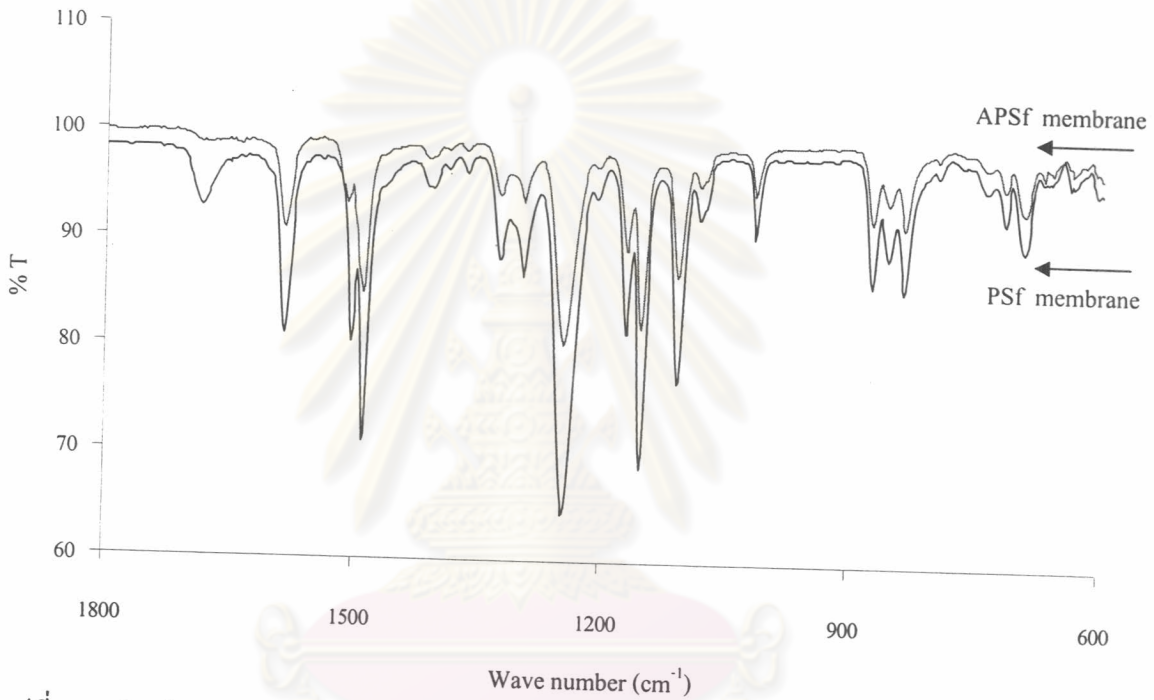
4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรน

1. เมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน

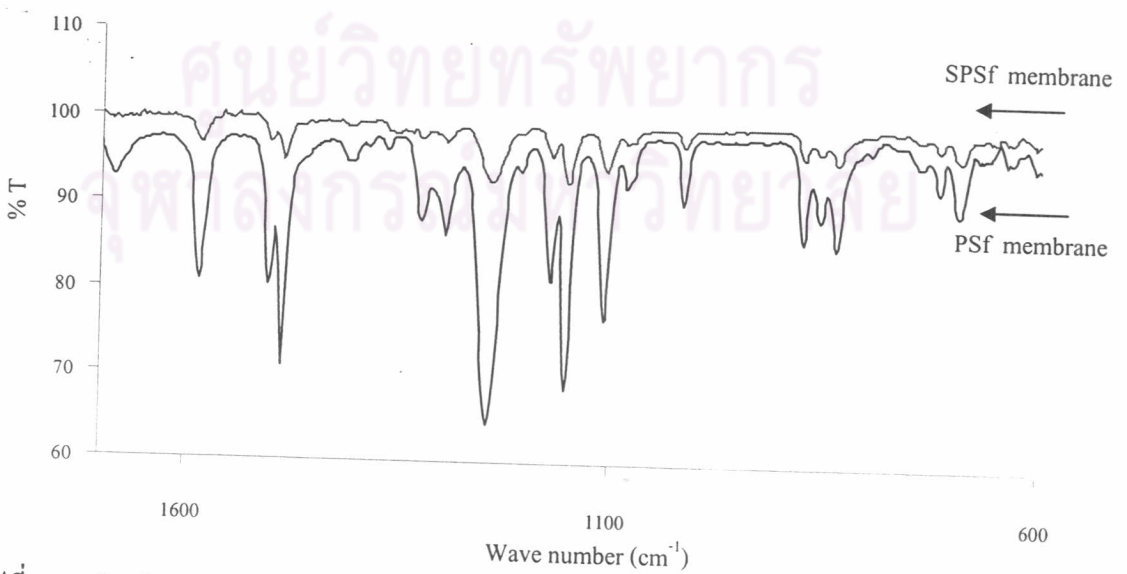
ถึงแม้มีการแปรผันเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงพอลิซัลโฟนกับสารละลายเอทิลีนไดเอมีนเป็นเวลา 3 และ 10 ชั่วโมง แต่เมื่อทดสอบโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนด้วยเครื่อง FTIR พบว่า ไม่ปรากฏพีกที่แตกต่างจากพีกที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟน แสดงว่าการเตรียมแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนด้วยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแอมิเนชันตามต้องการ แต่จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบชั้นผิวเนื้อแน่นชัดเจนกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟน จึงยังคงต้องศึกษาสมบัติอื่นๆ ต่อไป

2. เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน

ถึงแม้มีการแปรผันเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงพอลิซัลโฟนกับกรดซัลฟิวริกเป็น 2 และ 10 ชั่วโมง แต่ผลการทดสอบโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนด้วยเครื่อง FTIR พบว่าไม่ปรากฏพีกที่แตกต่างจากพีกที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟน แสดงว่าการเตรียมซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนด้วยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาซัลโฟเนชันตามต้องการ แต่จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบชั้นผิวเนื้อแน่นชัดเจนกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟน จึงยังคงต้องศึกษาสมบัติอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนและเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน



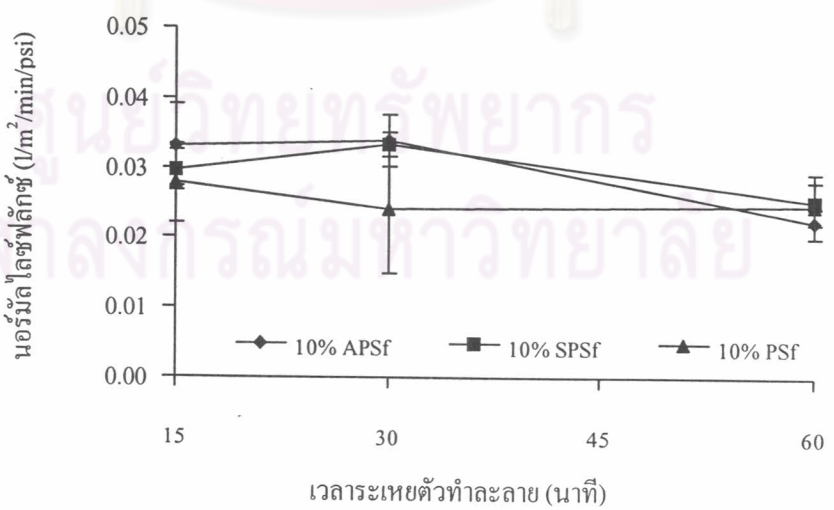
รูปที่ 4.15 อินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนและเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน

4.3.3 ผลการศึกษาฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

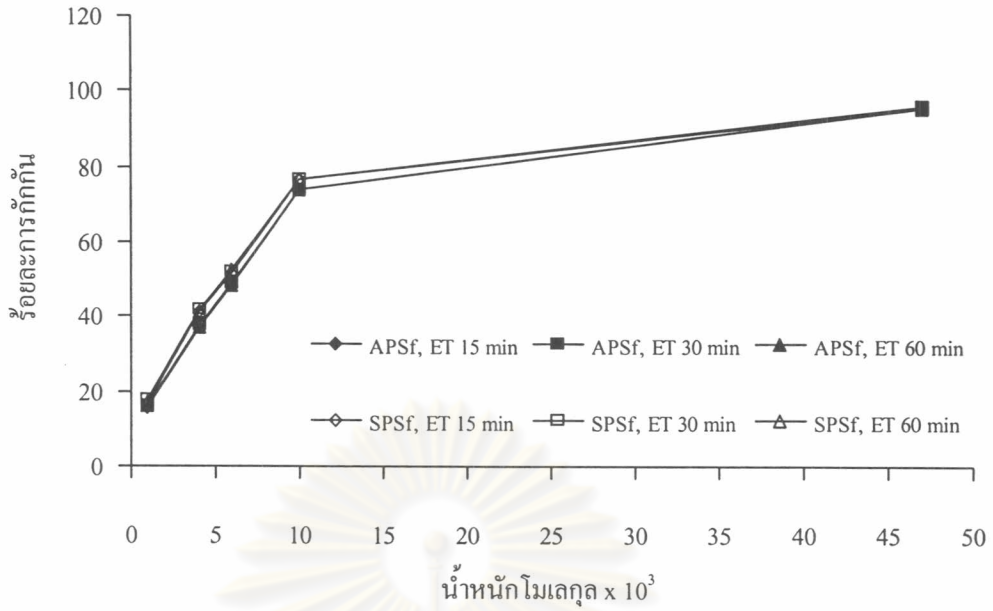
จากรูปที่ 4.16 เมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนมีค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์สูงที่สุด รองลงมาคือ เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนและเมมเบรนพอลิซัลโฟน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0298±0.0067, 0.0294±0.0042 และ 0.0256±0.0066 ลิตร/ตารางเมตร/นาที/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ (ที่สภาวะในการเตรียมเมมเบรนคือ ET 15-60 นาที, CT 20°C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมมเบรนมีความต้านทานการไหลใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดมีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบทรงกระบอกเหมือนกัน ดังนั้นค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

4.3.4 ผลการศึกษา MWCO

จากรูปที่ 4.17 เมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนและซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน สามารถกักกันสารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 47,000 ได้ร้อยละ 95.22±0.05 และ 95.64±0.04 ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน และซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่า MWCO เท่ากับ 47,000 เวลาระเหยตัวทำละลายและอุณหภูมิในอ่างน้ำไม่มีผลต่อค่า MWCO เมมเบรนที่เตรียมได้มีการกระจายขนาดของรูพรุนค่อนข้างกว้าง และมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเท่านั้น



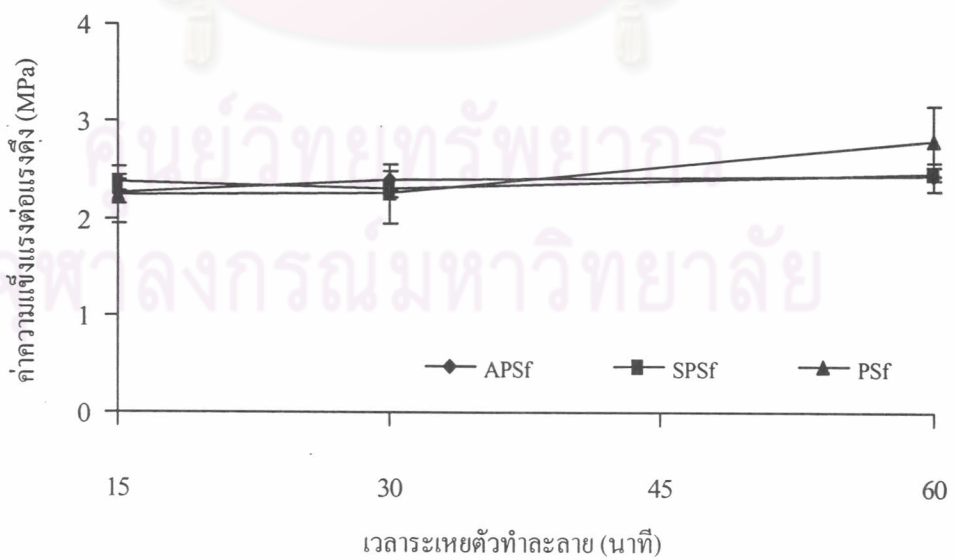
รูปที่ 4.16 ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนและเมมเบรนพอลิซัลโฟน



รูปที่ 4.17 MWCO ของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน

4.3.5 ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากรูป 4.18 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟน มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 2.36±0.14, 2.38±0.10 และ 2.43±0.40 เมกะปาสกาล ตามลำดับ (ที่ ET 15-60 นาที, CT 20°C) ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนเหมือนกัน ดังนั้นค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงไม่แตกต่างกัน

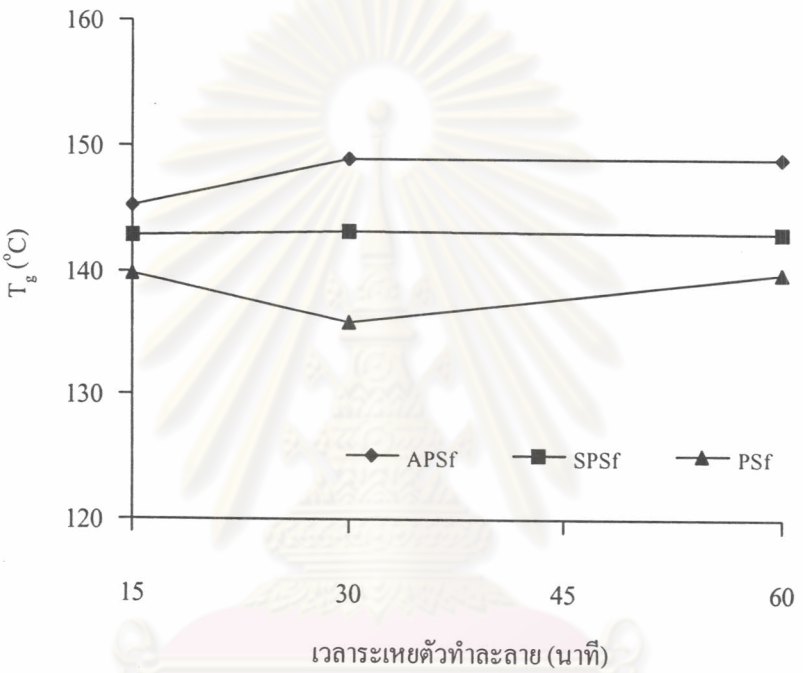


รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

จากรูปที่ 4.19 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟน โดยมีค่าเท่ากับ 147.69±2.22, 142.95±0.20 และ 138.29±2.34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ที่ ET 15-60 นาที, CT 20°C)



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟน

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนที่ผ่านมา พบว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะสมบัติไม่แตกต่างจากเมมเบรนพอลิซัลโฟน ยกเว้นค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และการมีชั้นผิวเนื้อแน่นที่ชัดเจนกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนท่านั้นที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ความแตกต่างจึงต้องนำเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด มาทำการศึกษาสมรรถนะในการบำบัดน้ำจากเขื่อนลำตะคองต่อไป

4.3.7 สมรรถนะของเมมเบรนในการบำบัดน้ำจากเขื่อนลำตะคอง

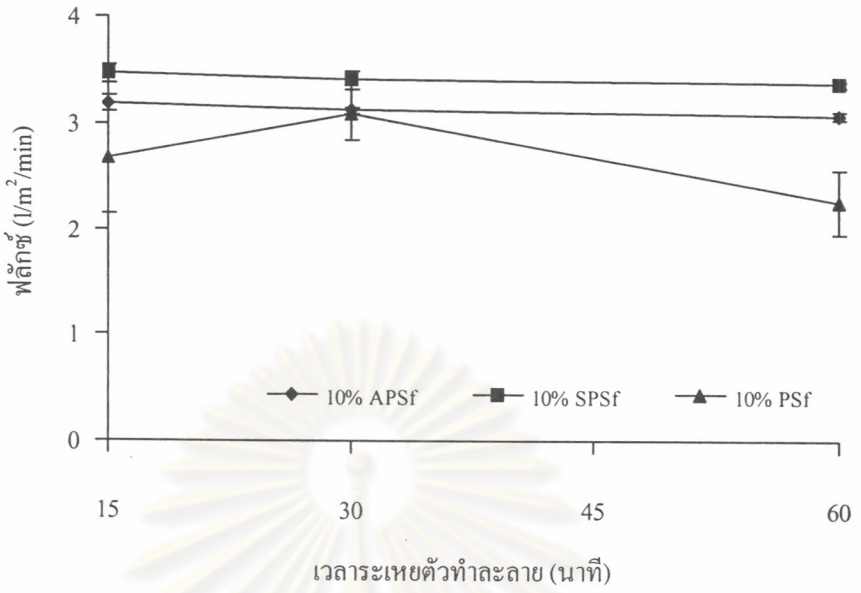
1. ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดิน

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนมีค่าฟลักซ์สูงที่สุด รองลงมาคือเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟนโดยมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 3.41±0.06, 3.12±0.07 และ 2.67±0.48 ลิตร/ตารางเมตร/นาที ตามลำดับ การที่เมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนมีค่าฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟน แสดงว่า ขั้นตอนการเตรียมแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน หรือซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แม้ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแอมิเนชันหรือซัลโฟเนชัน แต่อาจทำให้มีการบำบัดผิวหน้าของเมมเบรนเกิดขึ้น ส่งผลให้เมมเบรนมีความชอบน้ำมากยิ่งขึ้น

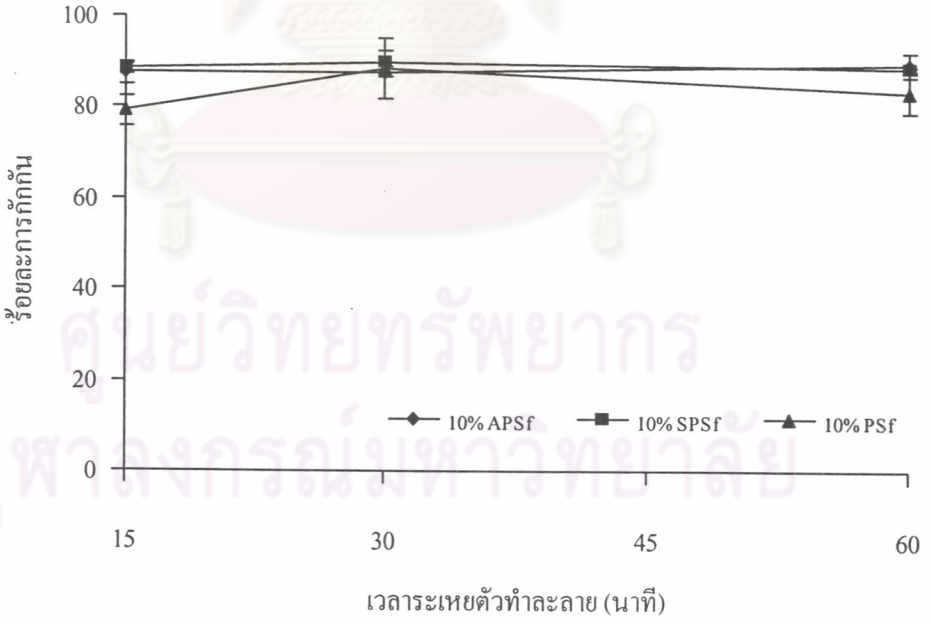
2. ค่าร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียและซีโอดี

ค่าร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนและเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินได้ทั้งหมดหรือร้อยละ 100 โดยไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรนเลย แสดงว่าเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนและเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนทุกสูตรสามารถกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้อย่างสมบูรณ์

จากรูปที่ 4.21 ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟนมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 88.24±2.06, 88.91±1.69 และ 83.72±5.91 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟนและเมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟนมีชั้นผิวเนื้อแน่นเกิดขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสามารถกักกันซีโอดีได้มากกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟน



รูปที่ 4.20 ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟน ที่ความดัน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4.21 ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนแอมิเนเตดพอลิซัลโฟน เมมเบรนซัลโฟเนเตดพอลิซัลโฟน และเมมเบรนพอลิซัลโฟน ที่ความดัน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การเตรียมเมมเบรนชนิดที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว

การเติมสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดลงในสารละลายพอลิซัลโฟนต้องมีปริมาณที่เหมาะสม โดยต้องสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นเมมเบรนได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการเติมสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดจึงมีปริมาณแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดที่เติมลงในสารละลายพอลิซัลโฟน

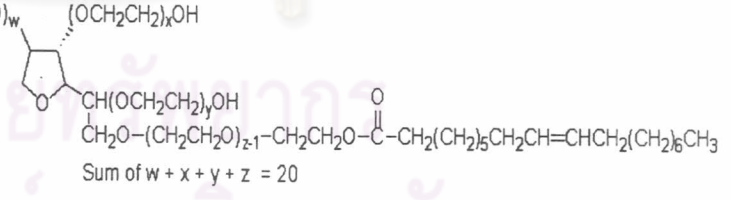
ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	ประเภทของสารลดแรงตึงผิว	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SDS	ชนิดประจุลบ	0.1 และ 0.5
BC	ชนิดประจุบวก	5 และ 1
TWEEN 80	ชนิดไร้ประจุ	1, 0.5 และ 0.1

หมายเหตุ

SDS สูตรเคมีคือ $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$

BC สูตรเคมีคือ $C_6H_5N(CH_3)_2RCl$

TWEEN 80 สูตรเคมีคือ

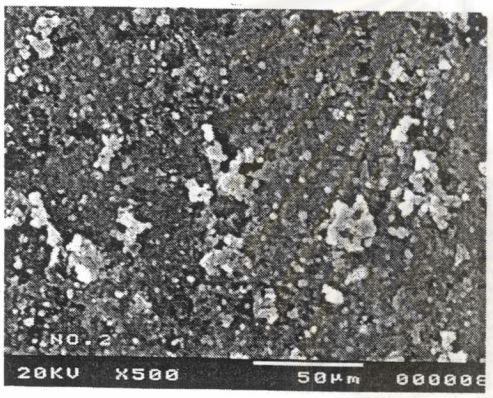


4.4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

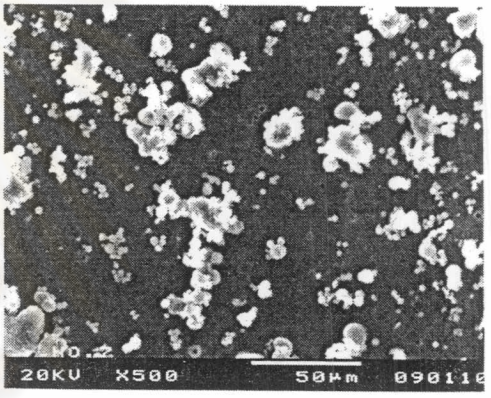
จากรูปที่ 4.22 มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด และเมมเบรนมีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร อธิบายได้ว่าสารลดแรงตึงผิวส่งผลต่อโครงสร้างของเมมเบรน คือ ลดอัตราการระเหยตัวทำละลายในเมมเบรน โดยสารลดแรงตึงผิวไปจับอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนทำให้อัตราการระเหยตัวทำละลายลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่ผิวหน้าเมมเบรนจึงเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเพิ่มชั้นผิวเนื้อแน่นในเมมเบรนลดลงตามไปด้วย

(Yamasaki และคณะ, 2000) และจากสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยส่วนชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ จึงทำให้เมมเบรนเกิดการเปียก (Wetting) ได้ดีในขั้นตอนการทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำ โดยน้ำสามารถแพร่เข้าไปในเมมเบรนได้มากขึ้นส่งผลให้เมมเบรนมีความพรุนมากยิ่งขึ้น

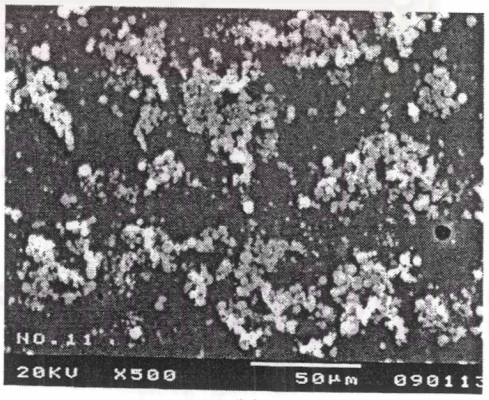
จากรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25 และ 4.26 เมมเบรนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมลอริลซัลเฟต และเบนซอลโคเนียมคลอไรด์มีโครงสร้างรูพรุนแบบฟองน้ำ ในขณะที่เมมเบรนที่มีการเติม TWEEN 80 เกิดโครงสร้างทั้งแบบรูพรุนคล้ายฟองน้ำและรูพรุนแบบทรงกระบอก อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่า เมมเบรนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างต่างจากเมมเบรนพอลิซัลโฟน



(a)

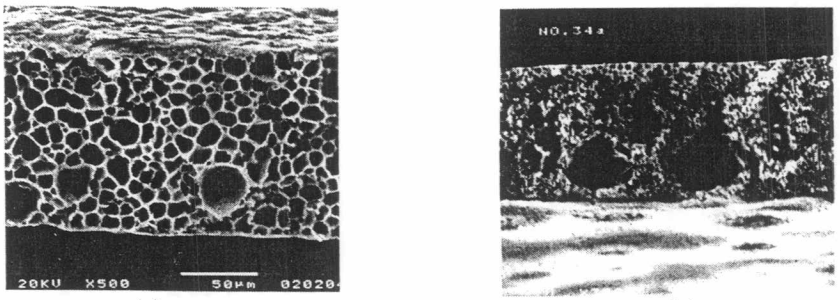


(b)



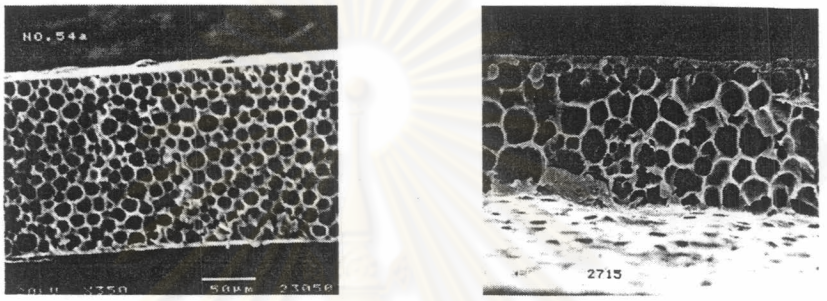
(c)

รูปที่ 4.22 ลักษณะผิวหน้าของเมมเบรน (a) PSf + SDS membrane, (b) PSf + BC membrane และ (c) PSf + TWEEN 80 membrane (ที่ ET 15 นาที, CT 20°C)



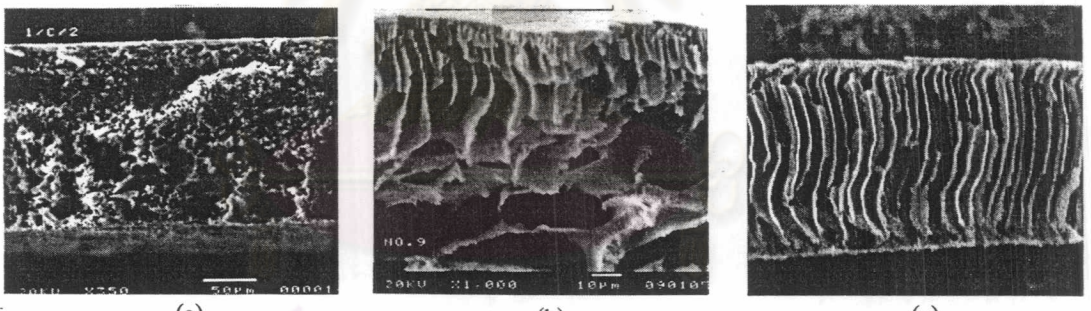
(a) (b)

รูปที่ 4.23 ภาคตัดขวางของเมมเบรน (a) PSf + 0.1% SDS membrane, (b) PSf + 0.5% SDS membrane (ที่ ET 15 นาที, CT 20°C)



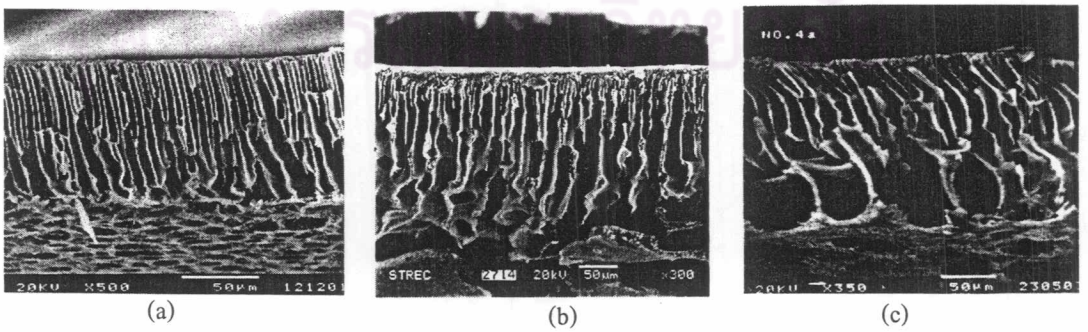
(a) (b)

รูปที่ 4.24 ภาคตัดขวางของเมมเบรน (a) PSf + 1% BC membrane, (b) PSf + 5% BC membrane และ (c) PSf membrane (ที่ ET 15 นาที, CT 20°C)



(a) (b) (c)

รูปที่ 4.25 ภาคตัดขวางของเมมเบรน (a) PSf + 0.1% TWEEN 80 membrane, (b) PSf + 0.5% TWEEN 80 membrane และ (c) PSf + 1% TWEEN 80 membrane (ที่ ET 15 นาที, CT 20°C)



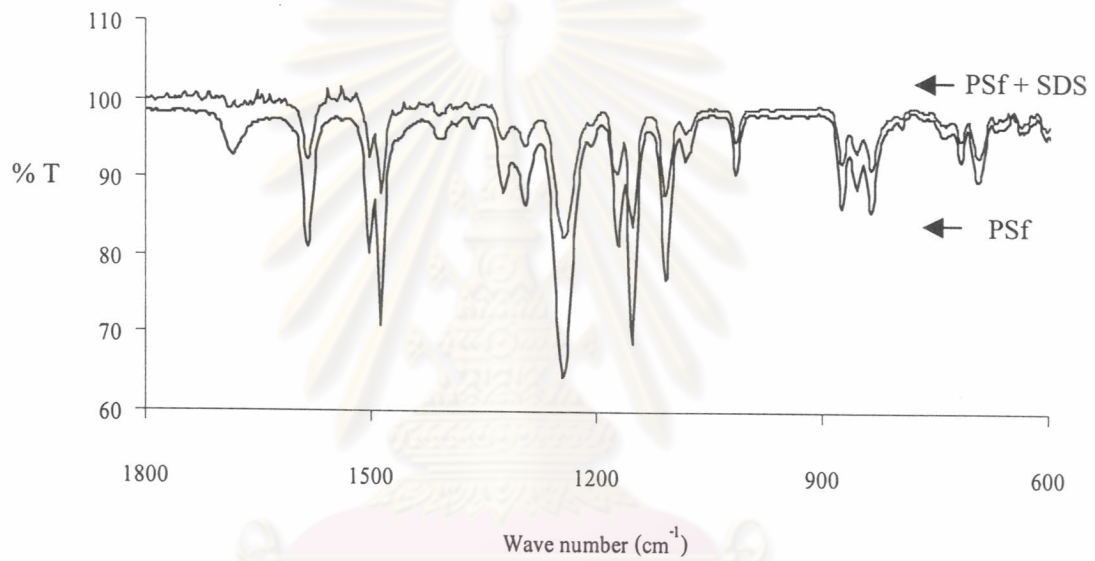
(a) (b) (c)

รูปที่ 4.26 ภาคตัดขวางของเมมเบรน (a) APSf membrane, (b) SPSf membrane และ (c) PSf membrane (ที่ ET 15 นาที, CT 20°C)

4.4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรน

1. เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต

นำเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟตไปทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงพีกที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนกับเมมเบรนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต ดังรูปที่ 4.27 แสดงว่าโซเดียมลอริลซัลเฟตไม่เกิดพันธะกับโครงสร้างของพอลิซัลโฟน

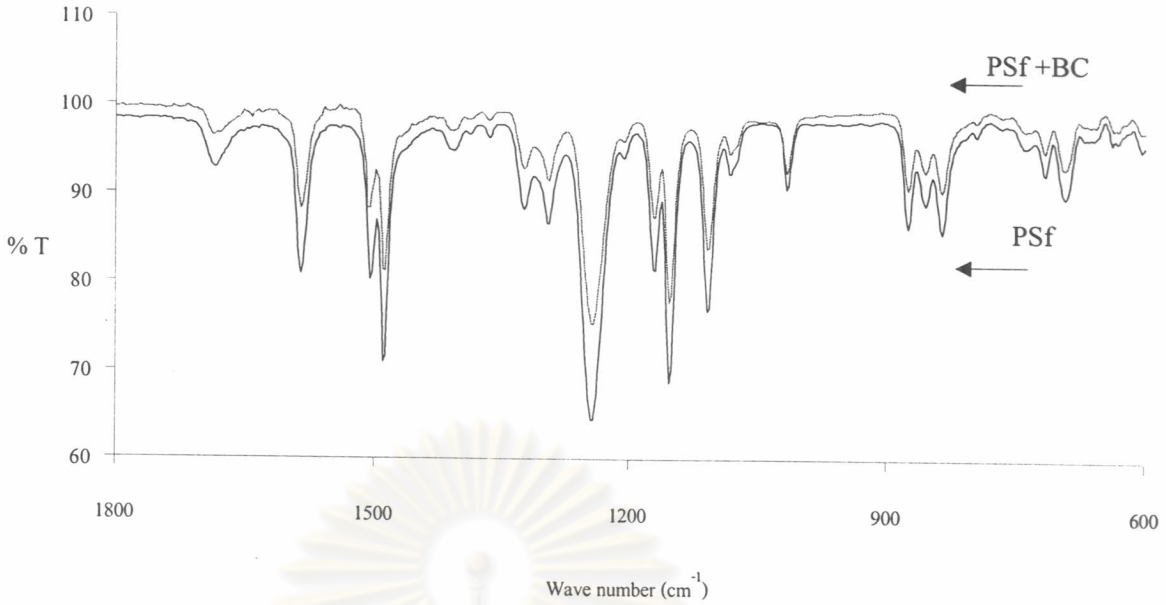


รูปที่ 4.27 อินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนและเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์

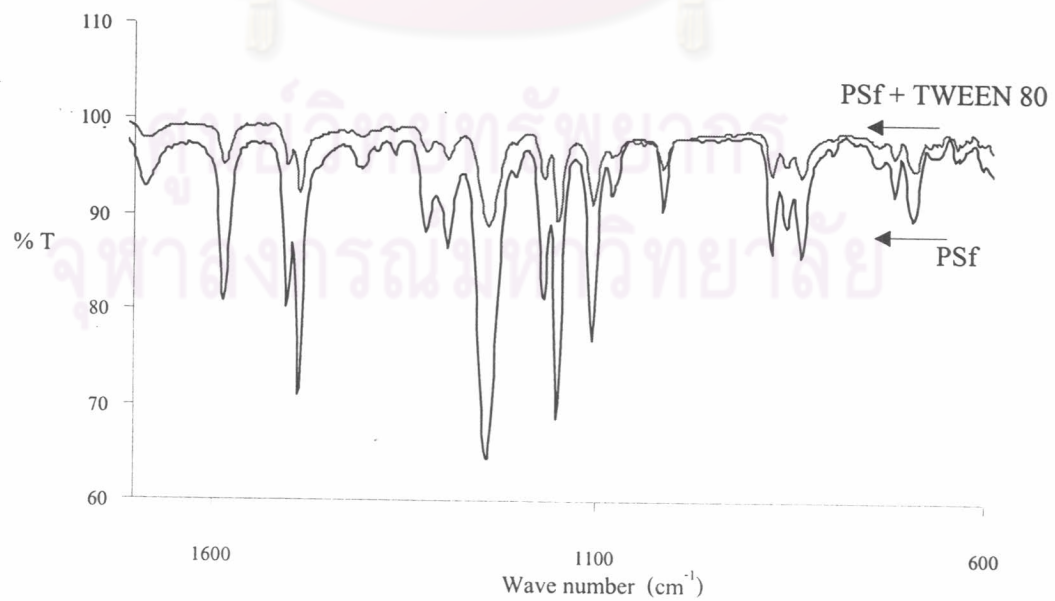
นำเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์ไปทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงพีกที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนกับเมมเบรนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์ลงไป ดังรูปที่ 4.28 แสดงว่าเบนซอลโคเนียมคลอไรด์ไม่เกิดพันธะกับโครงสร้างของพอลิซัลโฟน



รูปที่ 4.28 อินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนและเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์

3. เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติม TWEEN 80

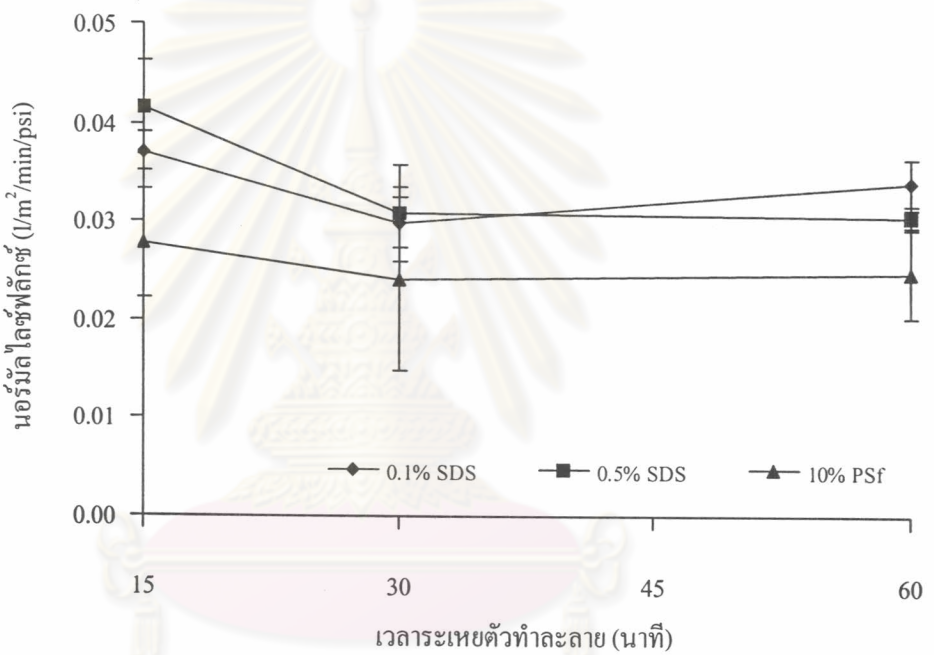
นำเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติม TWEEN 80 ไปทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงพีกที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนกับเมมเบรนที่มีการเติม TWEEN 80 ลงไป ดังรูปที่ 4.29 แสดงว่า TWEEN 80 ไม่เกิดพันธะกับโครงสร้างของพอลิซัลโฟน



รูปที่ 4.29 อินฟราเรดสเปคตรัมของเมมเบรนพอลิซัลโฟนและเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติม TWEEN 80

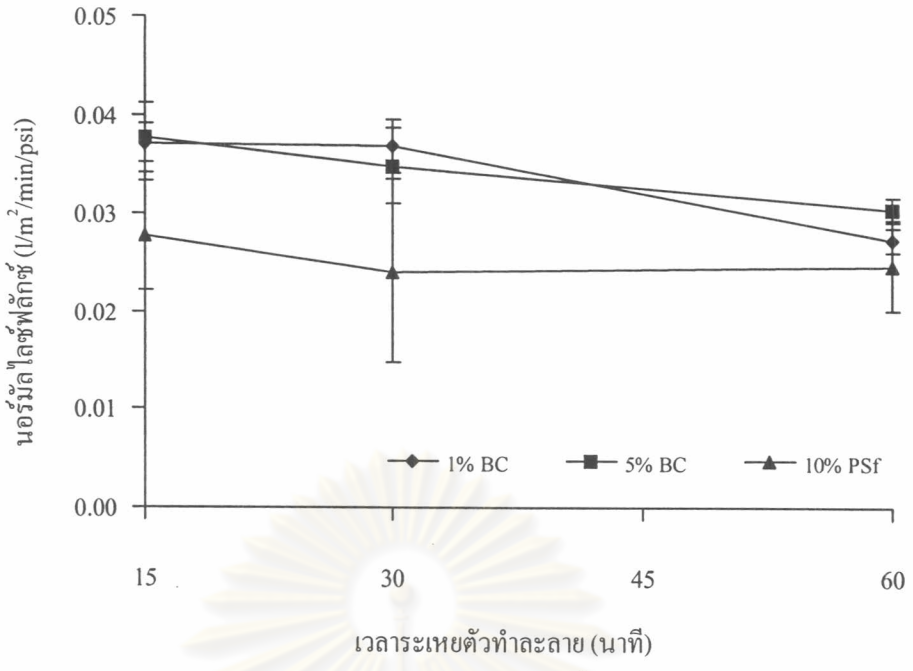
4.4.3 ผลการศึกษาฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

จากรูป 4.30 ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลซัลเฟตไม่มีผลต่อค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรน แต่มีค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนไม่เหมือนกันจึงทำให้มีความต้านทานการไหลแตกต่างกัน โดยเมมเบรนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.5 โดยน้ำหนัก และเมมเบรนพอลิซัลโฟนมีค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.0336±0.0038, 0.0303±0.0065 และ 0.0256±0.0066 ลิตร/ตารางเมตร/นาที/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ



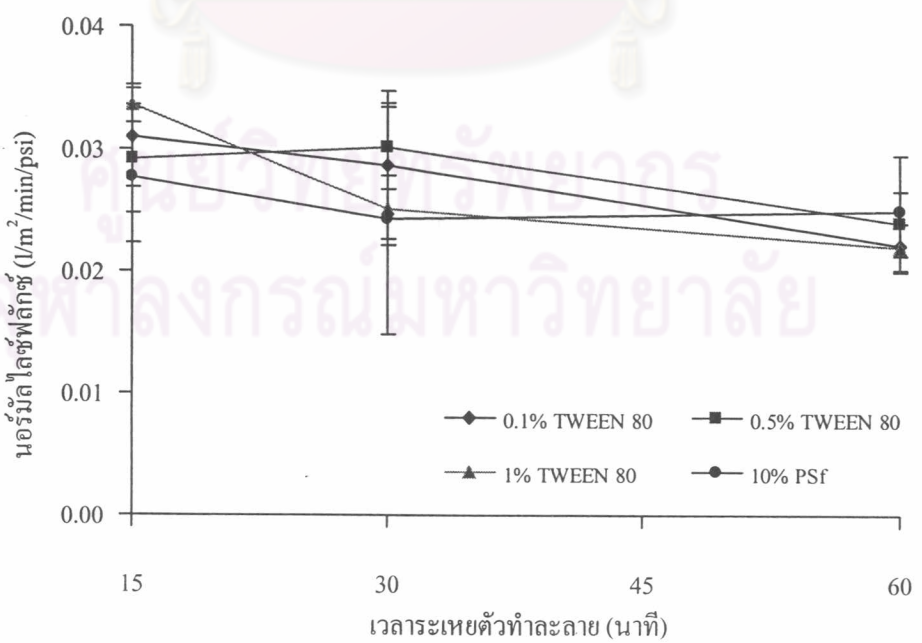
รูปที่ 4.30 ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต

จากรูปที่ 4.31 ความเข้มข้นของเบนซอลโคเนียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรน แต่มีค่านอร์มัลไลซ์ ฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนไม่เหมือนกันจึงทำให้มีความต้านทานการไหลแตกต่างกัน โดยค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และเมมเบรนพอลิซัลโฟนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0338±0.0050, 0.0343±0.0042 และ 0.0256±0.0066 ลิตร/ตารางเมตร/นาที/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์

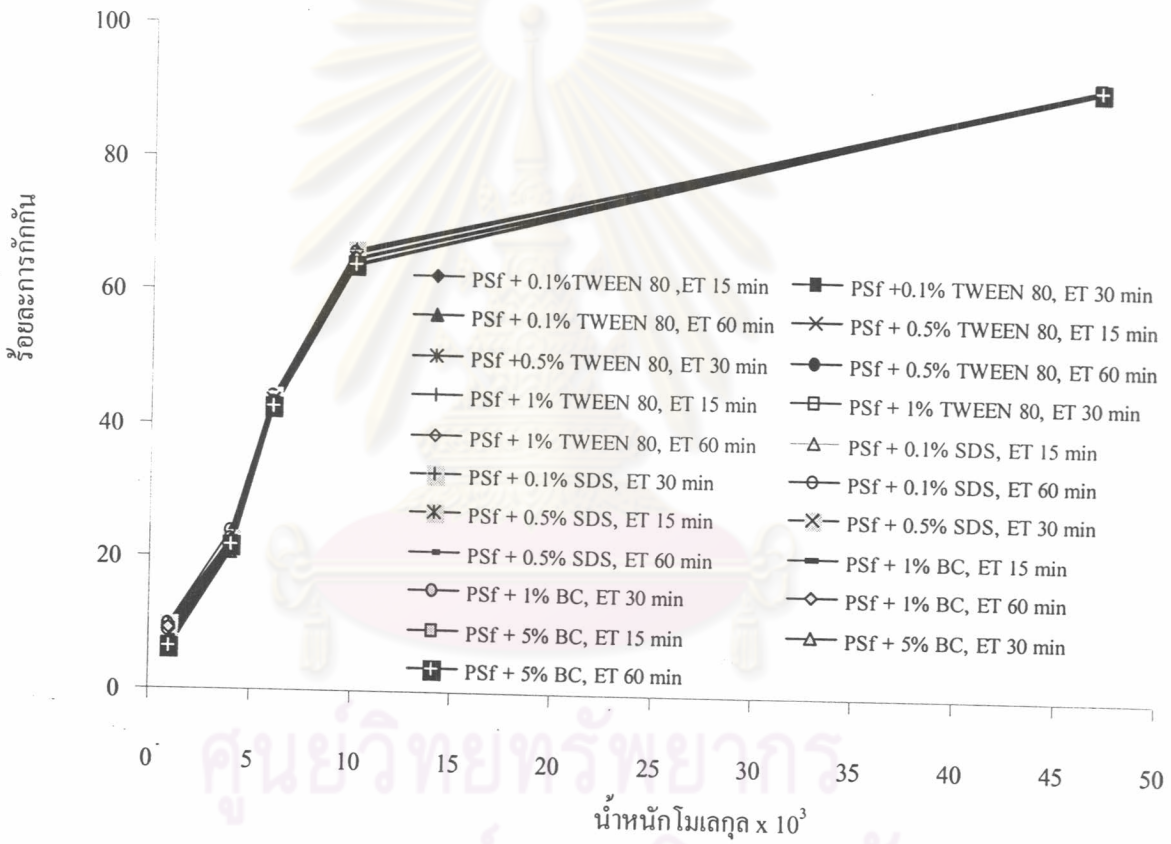
จากรูปที่ 4.32 ความเข้มข้นของ TWEEN 80 ไม่มีผลต่อค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรน และมีค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ใกล้เคียงกับเมมเบรนพอลิซัลโฟน ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนเหมือนกันจึงทำให้มีความต้านทานการไหลไม่แตกต่างกัน โดยค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติม TWEEN 80 ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก และเมมเบรนพอลิซัลโฟนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0272±0.0057, 0.0277±0.0044, 0.0268±0.0055 และ 0.0256±0.0066 ลิตร/ตารางเมตร/นาที/ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ



รูปที่ 4.32 ค่านอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติม TWEEN 80

4.4.5 ผลการศึกษา MWCO

จากรูปที่ 4.33 เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ และ TWEEN 80 มีค่า MWCO เท่ากับ 47,000 โดยมีค่าร้อยละการกักกันสารละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 47,000 เท่ากับร้อยละ 91.66±0.06, 91.79±0.09 และ 91.98±0.10 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าการกักกันสารละลาย PEG นี้มีค่าต่ำกว่าของเมมเบรนพอลิซัลโฟนตั้งต้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้เมมเบรนมีช่องว่างมากขึ้นและเมมเบรนที่เตรียมได้มีการกระจายขนาดของรูพรุนค่อนข้างกว้างรวมทั้งมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเท่านั้น

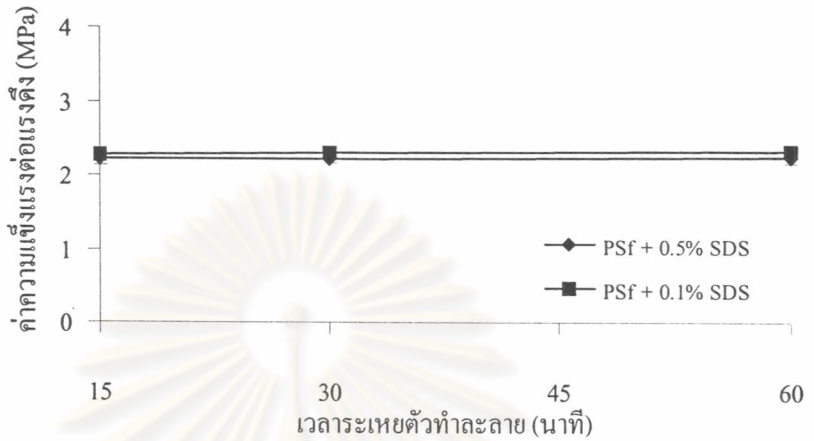


รูปที่ 4.33 MWCO ของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ และ TWEEN 80

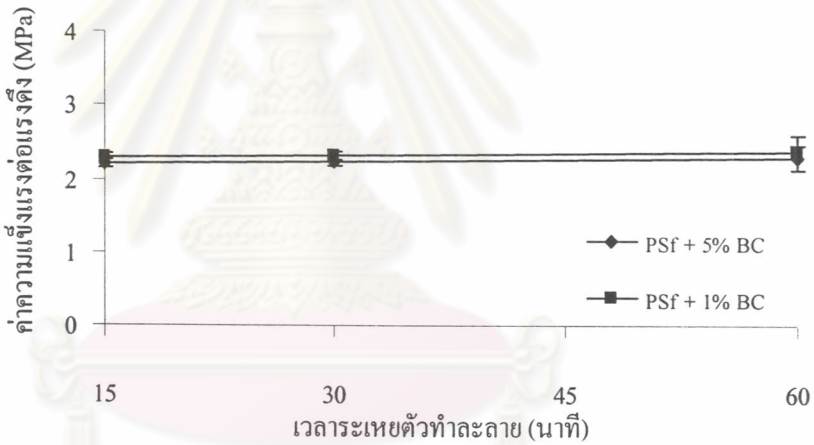
4.4.6 ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากรูปที่ 4.34 (a), (b) และ (c) ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและเวลาในการระเหยตัวทำละลายไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริล

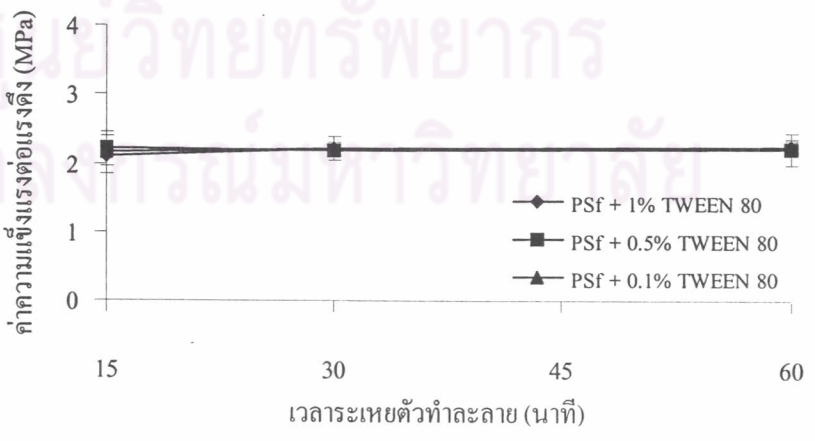
ซัลเฟต เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ และ TWEEN 80 มีค่าโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 2.26±0.07, 2.28±0.12 และ 2.21±0.16 เมกะปาสกาล ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างจากเมมเบรนพอลิซัลโฟน (2.43±0.40 เมกะปาสกาล)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.34 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต (a) เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ (b) และ TWEEN 80 (c)

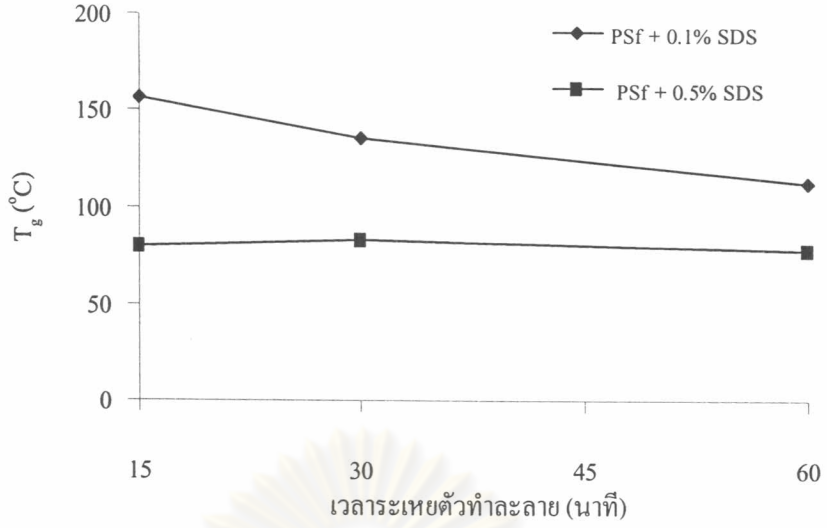
4.4.7 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

จากรูปที่ 4.35 (a), (b) และ (c) การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด ทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรนลดลง แต่เวลาในการระเหยตัวทำละลายไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรน การเพิ่มปริมาณการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในปริมาณมากๆ อาจส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้นค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจึงลดลง การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ทั้ง 3 ชนิด ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.3

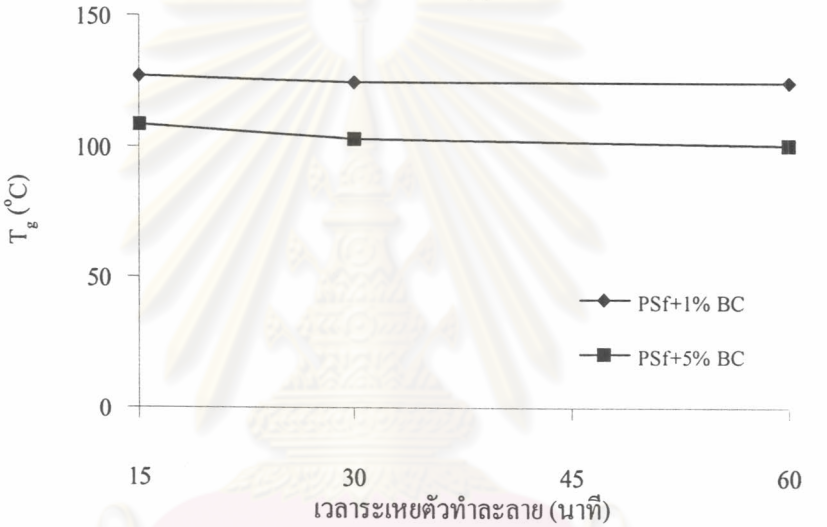
นอกจากนี้พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่พอเหมาะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรนไม่แตกต่างจากเมมเบรนพอลิซัลโฟน โดยเมมเบรนมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วง 135-150 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเมมเบรนทั้ง 6 ชนิด ที่ ET 15-60 นาที และ CT 20°C

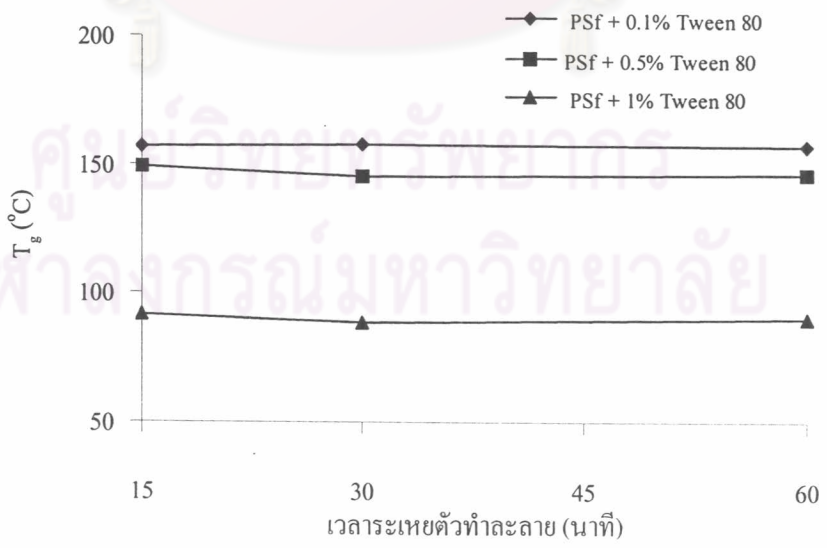
ชนิดเมมเบรน	ความเข้มข้น (โดยน้ำหนัก)	T_g (°C)
PSf + SDS membrane	0.1% SDS	134.92±21.80
	0.5% SDS	80.78±2.80
PSf + BC membrane	1% BC	125.13±1.51
	5% BC	104.16±3.97
PSf + TWEEN 80 membrane	0.1% TWEEN 80	157.40±0.61
	0.5% TWEEN 80	147.01±1.98
	1% TWEEN 80	89.58±1.45
APSf membrane	10%	147.69±2.22
SPSf membrane	10%	142.95±0.20
PSf membrane	10%	138.29±2.34



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.35 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้วของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต (a) เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ (b) และ TWEEN 80 (c)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

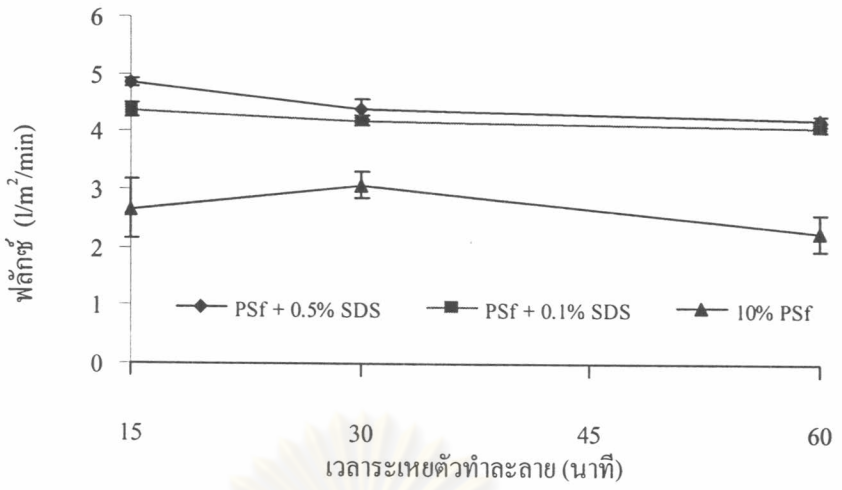
4.4.8 สมรรถนะของเมมเบรนในการบำบัดน้ำจากเขื่อนลำตะคอง

1. ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดิน

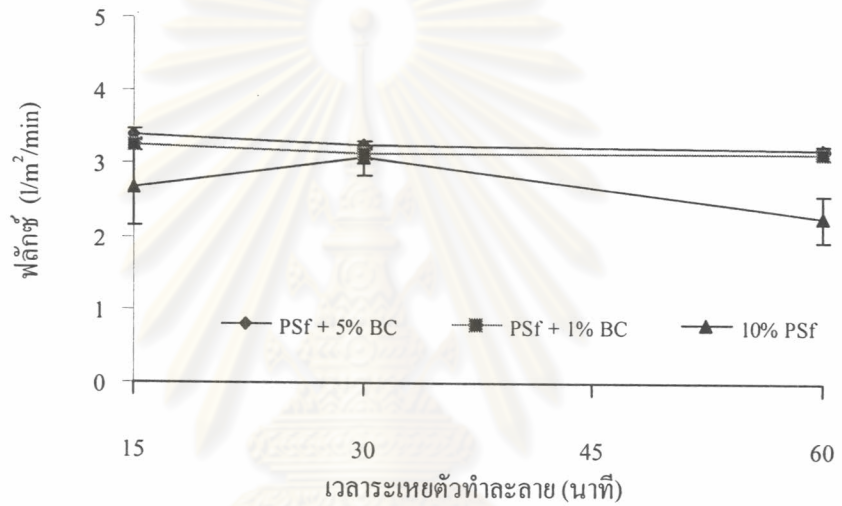
จากรูป 4.36 (a), (b) และ (c) เวลาในการระเหยตัวทำละลายไม่ส่งผลต่อฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินของเมมเบรน แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวทำให้ฟลักซ์การกรองน้ำผิวดินของเมมเบรนเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวอาจไปทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินของเมมเบรนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แสดงดังตาราง 4.4 เมมเบรนที่ให้ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินโดยเฉลี่ยสูงที่สุดคือเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต รองลงมาคือเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติม TWEEN 80 และเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมเบนซอลโคเนียมคลอไรด์ โดยมีค่าเท่ากับ 4.35±0.27, 3.30±0.44 และ 3.24±0.11 ลิตร/ตารางเมตร/นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินของเมมเบรนของเมมเบรนทั้ง 6 ชนิด ที่ ET 15-60 นาที และ CT 20°C

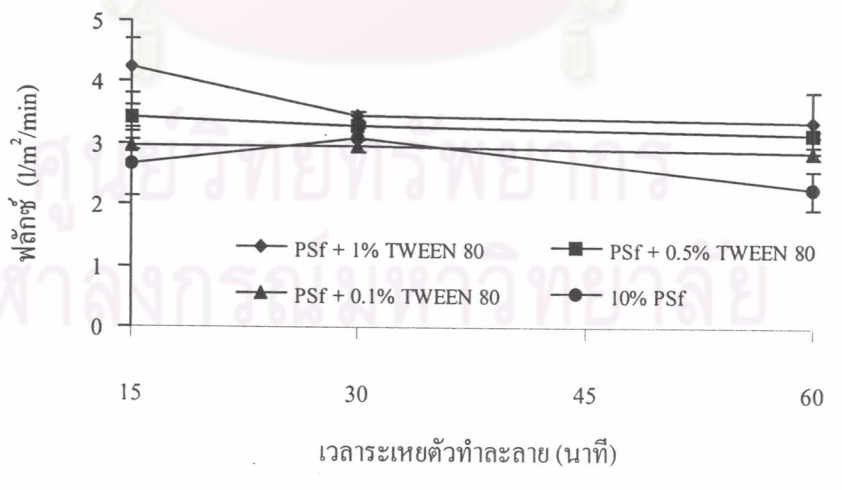
ชนิดเมมเบรน	ความเข้มข้น (โดยน้ำหนัก)	ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดิน (ลิตร/ตารางเมตร/นาที)
PSf + SDS membrane	0.1% SDS	4.22±0.12
	0.5% SDS	4.48±0.30
PSf + BC membrane	1% BC	3.18±0.10
	5% BC	3.30±0.10
PSf + TWEEN 80 membrane	0.1% TWEEN 80	2.93±0.09
	0.5% TWEEN 80	3.30±0.14
	1% TWEEN 80	3.69±0.54
APSf membrane	10%	3.12±0.07
SPSf membrane	10%	3.41±0.08
PSf membrane	10%	2.67±0.45



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.36 ฟลักซ์จากการกรองน้ำผิวดินของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต (a) เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ (b) และ TWEEN 80 (c)

2. ค่าร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียและซีโอดี

ค่าร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียของเมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ระเหยตัวทำละลายภายในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินได้ทั้งหมดหรือร้อยละ 100 โดยไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรนเลย แสดงว่าเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด ทุกสูตรสามารถกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้อย่างสมบูรณ์

จากรูปที่ 4.37 (a), (b) และ (c) เวลาในการระเหยตัวทำละลายไม่มีผลต่อค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวทำให้ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีลดลง ดังแสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.5 อย่างไรก็ตามเมมเบรนชนิดที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปบำบัดน้ำผิวดินให้เป็นน้ำดื่มต้องมีค่าร้อยละการกักกันซีโอดีเท่ากับ ร้อยละ 86

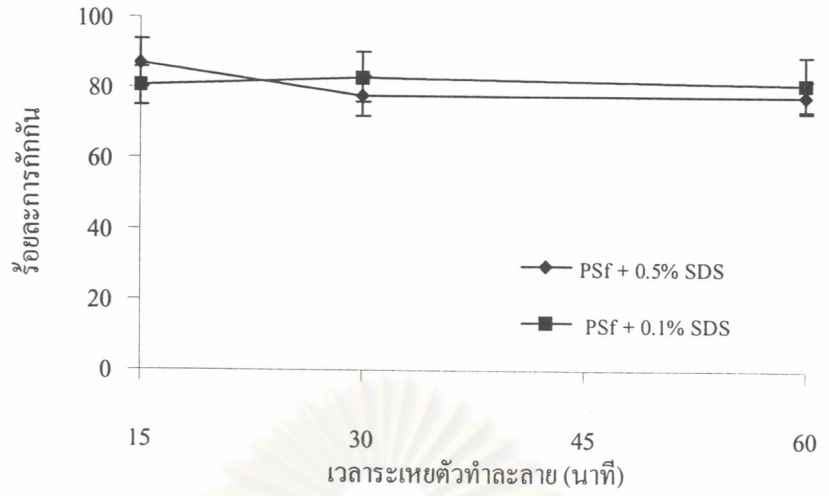
การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีและโคลิฟอร์มแบคทีเรียเกิดจากการติดค้างบนผิวเมมเบรนหรือการคัดขนาด (Sieving or size exclusion) และการเกาะติดกันเองของอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในน้ำดิบเช่นเดียวกับเมมเบรนพอลิซัลโฟน นอกจากนี้ประจุบนผิวของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปยังอาจส่งผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

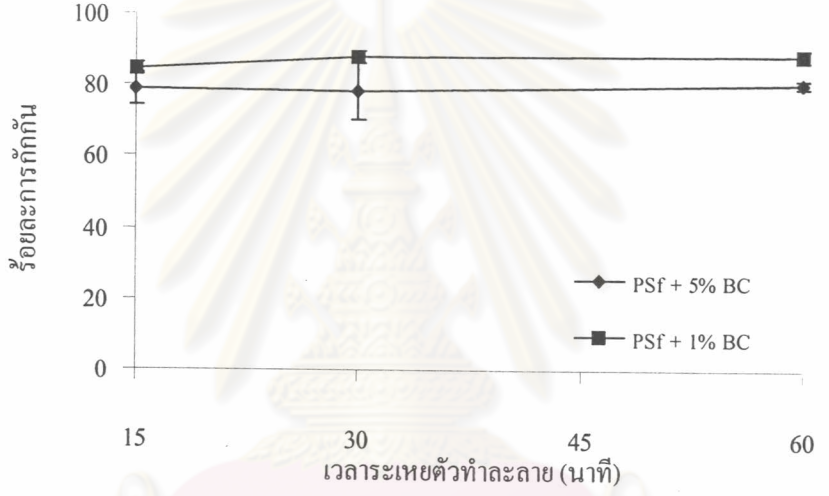
ตารางที่ 4.5 ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนของเมมเบรนทั้งหมด ที่ ET 15-60 นาที และ CT 20°C

ชนิดเมมเบรน	ความเข้มข้น (โดยน้ำหนัก)	เวลาระเหยตัวทำละลาย (นาที)	ร้อยละการกักกันซีโอดี	ร้อยละการกักกันซีโอดี (เฉลี่ย)
PSf + SDS membrane	0.1% SDS	15	80.49	82.64±5.94
		30	83.00	
		60	81.43	
	0.5% SDS	15	86.77	80.68±6.85
		30	77.69	
		60	77.57	
PSf + BC membrane	1%BC	15	84.73	87.15±2.38
		30	88.03	
		60	88.70	
	5%BC	15	78.97	79.34±4.72
		30	78.34	
		60	80.71	
PSf + TWEEN 80 membrane	0.1% TWEEN 80	15	87.76	87.96±2.18
		30	87.63	
		60	88.48	
	0.5% TWEEN 80	15	84.19	87.49±3.52
		30	88.64	
		60	89.64	
	1% TWEEN 80	15	80.23	83.70±3.99
		30	84.80	
		60	86.08	
APSf membrane	10%	15-60	-	88.24±2.06
SPSf membrane	10%	15-60	-	88.91±1.69
PSf membrane	10%	15-60	-	83.72±5.91

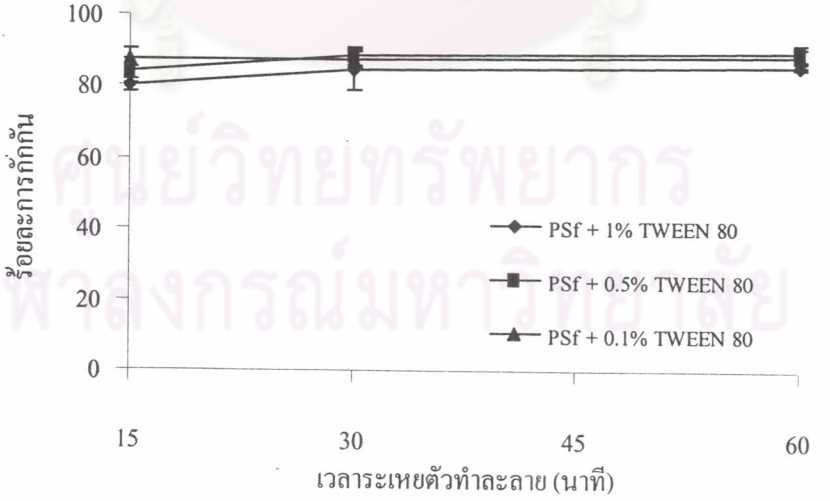
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.37 ค่าร้อยละการกักกันซีโอดีของเมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมโซเดียมลอริลซัลเฟต (a) เบนซอลโคเนียมคลอไรด์ (b) และ TWEEN 80 (c)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ลักษณะสมบัติของเมมเบรนทั้งหมด

ชนิดเมมเบรน	นอร์มัลไลซ์ฟลักซ์ ($l/m^2/min/psi$)	MWCO	ความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)	T_g (°C)	ฟลักซ์ ($l/m^2/min$)	ความเข้มข้นซีโอดี (mg/l) (ร้อยละการกักกันซีโอดี)	ร้อยละการกักกันโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
PSf Membrane	0.026±0.007	47,000	2.43±0.40	138.29±2.34	2.67±0.45	7.6±2.7 (83.72±5.91)	100
APSf membrane	0.030±0.007	47,000	2.36±0.14	147.69±2.22	3.12±0.07	8.2±3.4 (88.24±2.06)	100
SPSf membrane	0.029±0.004	47,000	2.38±0.10	142.95±0.20	3.41±0.08	7.8±3.7 (88.91±1.69)	100
PSf + 0.1% SDS membrane	0.033±0.0038	47,000	2.30±0.6	134.92±21.8	4.22±0.12	12.9±3.7 (82.64±5.94)	100
PSf + 0.5% SDS membrane	0.034±0.0065	47,000	2.23±0.07	80.78±2.80	4.48±0.30	13.5±4.0 (80.68±6.85)	100
PSf + 1% BC membrane	0.034±0.0050	47,000	2.33±0.13	125.13±1.51	3.18±0.10	8.9±1.7 (87.15±2.38)	100
PSf + 5% BC membrane	0.034±0.0042	47,000	2.24±0.10	104.16±3.97	3.30±0.10	14.5±3.8 (79.34±4.72)	100
PSf +0.1% TWEEN 80 membrane	0.027±0.0057	47,000	2.21±0.08	157.40±0.61	2.93±0.09	8.4±3.9 (87.96±2.18)	100
PSf +0.5% TWEEN 80 membrane	0.028±0.0044	47,000	2.21±0.19	147.01±1.98	3.30±0.14	8.8±3.8 (87.49±3.52)	100
PSf + 1% TWEEN 80 membrane	0.027±0.0055	47,000	2.20±0.20	89.58±1.45	3.69±0.54	11.4±3.7 (83.70±3.99)	100

จากตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรนที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า เมมเบรนพอลิซัลโฟนที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวมีลักษณะสมบัติไม่แตกต่างจากเมมเบรนพอลิซัลโฟน ดังนั้นเมมเบรนที่เหมาะต่อการบำบัดน้ำผิวดินให้ป็นน้ำดื่ม คือ เมมเบรนพอลิซัลโฟนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ระเหยตัวทำละลายในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 15-60 นาที และทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย