

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

ผลการดำเนินการทดลองเพื่อกำจัดฟอสโฟไลปิดออกจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนแบบ ไทลขวาง มีดังต่อไปนี้

4.1 น้ำมันปาล์มดิบ

น้ำมันปาล์มดิบมีลักษณะขุ่นหนืดเป็นไข มีสีเหลืองเข้มและหนืด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 คุณสมบัติทางเคมีประกอบด้วยองค์ประกอบหลักหลายชนิด โดยในโครงการนี้แสดงปริมาณกรดไขมันอิสระ 3 ชนิดหลักๆ คือ กรดไขมันโอเลอิก กรดไขมันลอริกและกรดไขมันปาล์มมิติกดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันอิสระและฟอสโฟไลปิด พบว่าค่ากรดไขมันอิสระและฟอสโฟไลปิดในงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับแหล่งข้อมูลที่ 3, 4 และ 5 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลที่ 2 พบว่า มีค่ากรดไขมันอิสระและฟอสโฟไลปิดมากกว่า ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะวัตถุดิบ การหีบ อายุและวิธีการเก็บรักษา เป็นต้น



รูปที่ 4.1 น้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระ และฟอสโฟไลปิดของน้ำมันปาล์มดิบในงานวิจัยนี้และแหล่งข้อมูลอื่น

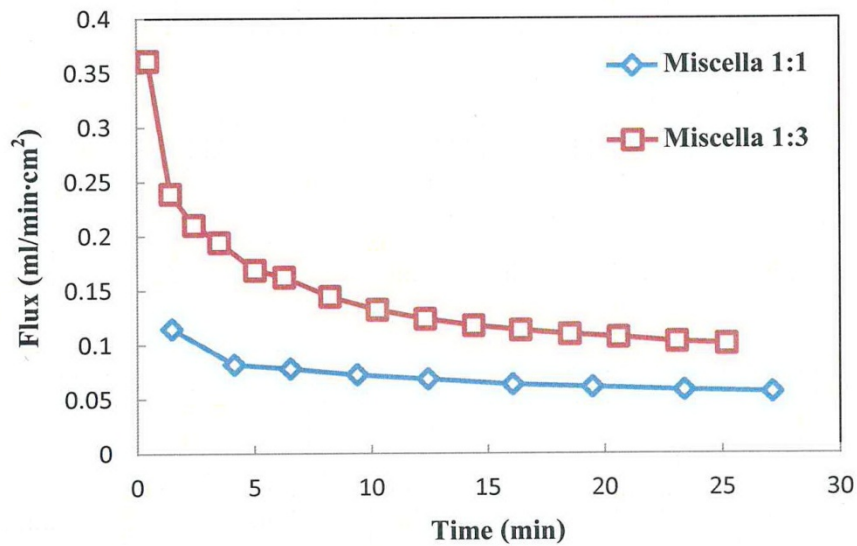
ลำดับ	แหล่งข้อมูล	กรดไขมันอิสระ			ฟอสโฟไลปิด mg kg ⁻¹
		กรดโอเลอิก (%)	กรดลอริก (%)	กรดปาล์มเมติก(%)	
1	ในงานวิจัยนี้	5.4	3.8	4.9	174
2	Arora S. <i>et al.</i> (2006)	39.6	-	42.6	920
3	ศูนย์วิจัยปาล์ม น้ำมันสุราษฎร์ธานี	9.2-11.6	1.0-1.4	3.8-4.8	-
4	วิชณีย์ และคณะ	-	-	6.2	-
5	Kusum <i>et al.</i> (2011)	-	-	-	5 -130

4.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอท

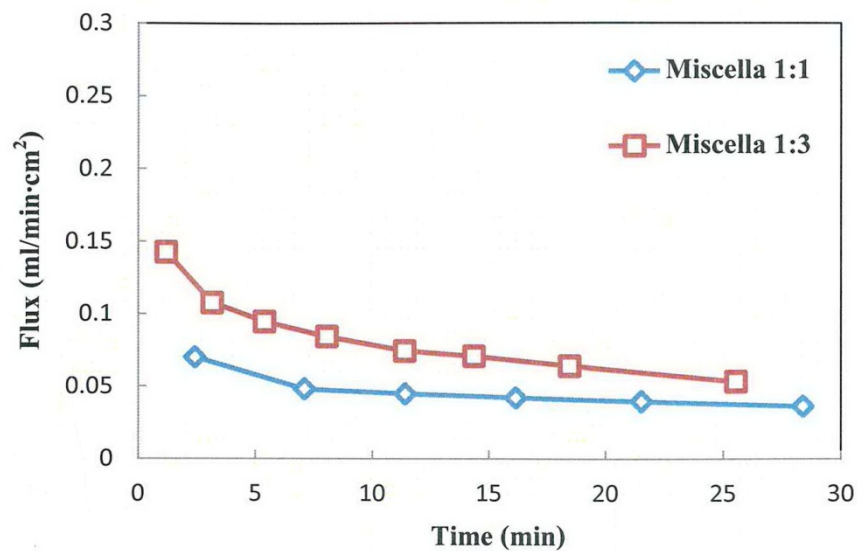
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของน้ำมันปาล์มดิบโดยไม่ผสมเฮกเซน พบว่าให้ค่าฟลักซ์ไม่สูงนัก ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำมันปาล์มดิบมีความหนืดมากนั่นเอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้สารป้อนเป็นมิสเซลล์ที่อัตราส่วนเชิงน้ำหนักของสารป้อนระหว่างน้ำมันปาล์มดิบ:เฮกเซนเป็น 1: 1 และ 1:3 ทั้งนี้เพื่อลดค่าความหนืดของสารป้อน รูปที่ 4.2-4.4 แสดงค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทต่อเวลาของเมมเบรนเซรามิกทั้งสามชนิดระหว่างมิสเซลล์ 1:1 กับ 1:3 พบว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของสารป้อนทั้งสองอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการกรองนานขึ้นทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคอนเซโพลไรเซชันขึ้นบนผิวหน้าเมมเบรน และเหนียวนำไปเกิดเจลที่ผิวหน้าเมมเบรนนั่นเอง โดยผลจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ดังนั้นฟลักซ์ของมิสเซลล์ 1:1 จึงมีค่าน้อยกว่ามิสเซลล์ 1:3 นอกจากนี้การลดลงของฟลักซ์เป็นผลจากการสะสมตัวของฟอสโฟไลปิดที่คงค้างและขนาดรูพรุนที่เล็กของเมมเบรน ดังนั้นเค้กที่เกิดขึ้นในช่วงแรกส่งผลทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ โดยความหนาของเค้กถูกควบคุมด้วยความเร็วแบบไหลขวางที่ใช้นั่นเอง (Souza M.P.d., 2008)

นอกเหนือดังกล่าวแล้ว การลดลงของฟลักซ์น่าจะเป็นผลมาจากสภาพพื้นผิวที่มีความชอบน้ำของเมมเบรนด้วยเช่นกัน ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับของโมเลกุลน้ำที่มีปนอยู่ปริมาณน้อยในเฮกเซน ซึ่งพฤติกรรม การชอบน้ำของพื้นผิวเมมเบรนที่เกิดในรูพรุนขนาดเล็กนี้ ส่งผลต่ออัตราการไหลของฟลักซ์เพอร์มิเอท

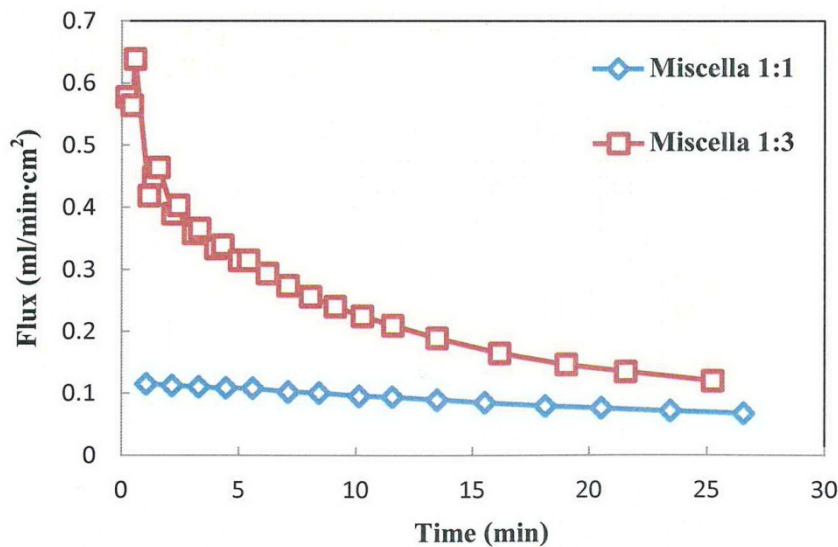
มึสเซลล่าได้เช่นกัน ในบางกรณีน่าจะส่งผลทำให้รูพรุนเกิดการอุดตันแบบสมบูรณ์ (complete pore blocking) อันเนื่องมาจากการเกิดเมนิสคัสที่เป็นผลจากการรวมตัวของน้ำที่ทำกับผิวเมมเบรน (Marenchino R. และคณะ 2006)



รูปที่ 4.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอตต่อเวลาของเมมเบรนเซรามิก M1 ระหว่างมึสเซลล่า 1:1 กับ 1:3

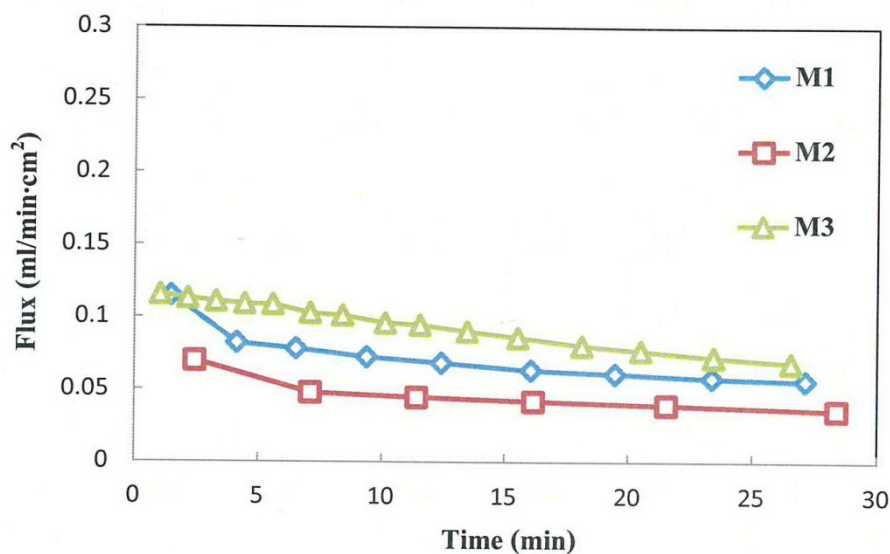


รูปที่ 4.3 ฟลักซ์เพอร์มิเอตต่อเวลาของเมมเบรนเซรามิก M2 ระหว่างมึสเซลล่า 1:1 กับ 1:3

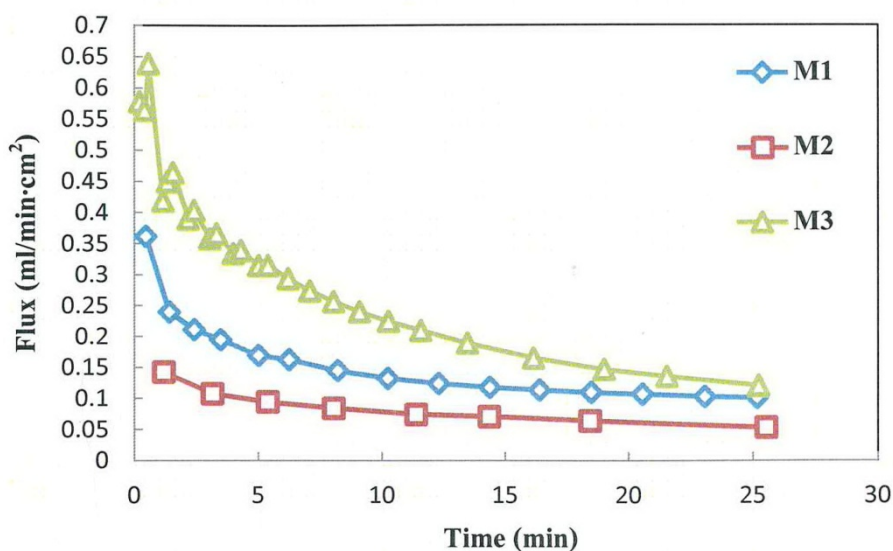


รูปที่ 4.4 ฟลักซ์เพอร์มิเอทต่อเวลาของเมมเบรนเซรามิก M3 ระหว่างมิสเซลล่า 1:1 กับ 1:3

จากผลการทดลอง เห็นได้ว่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของมิสเซลล่า 1:3 มีค่ามากกว่ามิสเซลล่า 1:1 ในทุกการทดลอง เนื่องจากมิสเซลล่า 1:3 มีปริมาณน้ำมันปาล์มดิบน้อยกว่ามิสเซลล่า 1:1 ทำให้มีความหนืดน้อยกว่า เพราะกลไกการกรองมีผลจากความหนืดเกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการลดความหนืดทั้งจากการใช้ตัวทำละลายหรือการใช้อุณหภูมิสูงจึงสามารถเพิ่มฟลักซ์เพอร์มิเอทได้ (Marenchino R. และคณะ 2006) สำหรับเมมเบรนเซรามิก M3 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทสูงสุด เป็นเพราะมีพื้นที่การกรองมากกว่า M1 และ M2 สำหรับแนวโน้มการลดลงของฟลักซ์ในช่วงแรกจะเกิดขึ้นเร็ว ทั้งนี้เพราะคอนเซนเตรชันโพราไรเซชันที่กล่าวข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดลงอย่างมากของมิสเซลล่า 1:3 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของเมมเบรนทั้งสามชนิด พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือเมื่อเวลาผ่านไปค่าฟลักซ์ลดลง เนื่องจากเกิดขึ้นแค้กบนผิวหน้าของเมมเบรนระหว่างการกรอง



รูปที่ 4.5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทต่อเวลาของมิสเซลล์ 1:1 ระหว่างเมมเบรนเซรามิก M1, M2 และ M3



รูปที่ 4.6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทต่อเวลาของมิสเซลล์ 1:3 ระหว่างเมมเบรนเซรามิก M1, M2 และ M3

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทต่อเวลาของมิสเซลล์ 1:1 และ 1:3 ระหว่างเมมเบรนเซรามิกทั้งสามชนิด พบว่าเมมเบรน M3 มีค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทที่มากที่สุด อาจเป็นเพราะเมมเบรน M3 มีพื้นที่การกรองมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนเซรามิก M1 และเมมเบรน M2 จะเห็นได้ว่าเมมเบรนเซรามิก M1 มีค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทมากกว่า M2 ซึ่งทั้งสองชนิดมาจากแหล่งที่แตกต่างกัน ในทำนองเดียวกันกราฟรูปที่ 4.6 ให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.5 นั่นคือ เมมเบรน M3 มีค่าฟลักซ์มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.5 พบว่าภายในช่วง 5 นาทีแรกของกราฟรูปที่ 4.5 ค่าจะฟลักซ์จะลดลง

เรื่อยๆ เพราะเกิดการรวมตัวของชั้นเค้กตั้งแต่เริ่มกรอง ตารางที่ 4.2 แสดงค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของเซรามิก เมมเบรนทั้งสามชนิดระหว่างมิสเซลล์ล่า 1:1 กับ 1:3 จากตารางเมื่อเปรียบเทียบระหว่างมิสเซลล์ล่า 1:1 กับ 1:3 จะเห็นได้ว่าที่มิสเซลล์ล่า 1:3 มีค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทสูงกว่ามิสเซลล์ล่า 1:1 ทั้งสามชนิดเมมเบรน และเมื่อ เปรียบเทียบที่มิสเซลล์ล่า 1:3 ระหว่างเซรามิกเมมเบรนทั้งสามชนิดพบว่าเมมเบรนเซรามิก M3 มีค่าฟลักซ์เพอร์ มิเอทมากที่สุดคือ $0.120 \text{ mL/min}\cdot\text{cm}^2$

ตารางที่ 4.2 ค่าฟลักซ์เฉลี่ยเพอร์มิเอทต่อเวลา

เมมเบรน	Flux ($\text{mL/min}\cdot\text{cm}^2$)	
	มิสเซลล์ล่า 1:1	มิสเซลล์ล่า 1:3
M1	0.056	0.101
M2	0.037	0.053
M3	0.068	0.120

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของมิสเซลล์ล่าสารป้อน, มิสเซลล์ล่าที่ผ่านการกรองหรือเพอร์มิเอท, และมิสเซลล์ล่าของกระแสรีเทนเทท แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 พบว่าเพอร์มิเอทมีความใส โดยไขส่วนใหญ่ ยังคงค้างในรีเทนเทท นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของสีรีเทนเททและเพอร์มิเอท สำหรับฟาล์วถังในการ ทดลองนี้พบว่าความหนาของเค้กมีค่ามาก ทั้งนี้เป็นเพราะระบบไม่สามารถปรับความเร็วได้สูง ทำให้ความเร็ว ไหลขวางไม่เพียงพอที่จะลดความหนาของเค้กลง การสะสมตัวของเค้กจึงมีผลต่อฟลักซ์เพอร์มิเอทเช่นกัน ใน ทำนองเดียวกันการเกิดโพราไลเซชันที่ผิวหน้าเมมเบรนส่งผลต่อการไหลของเพอร์มิเอท (Lin *et al.*, 1997)



รูปที่ 4.7 แสดงมิสเซลล์ล่าของสารป้อน, เพอร์มิเอท และรีเทนเทท ตามลำดับ

4.3 กรดไขมันอิสระ

น้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยกรดไขมันอิสระในสัดส่วนต่างๆ โดยความสามารถการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันปาล์มดิบของมิสเซลล์ล่า 1:1 และ 1:3 แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 จากข้อมูลผลการทดลองข้างต้น พบว่าเมมเบรนเซรามิกทั้งสามชนิดมีความสามารถในการกักกันกรดไขมันอิสระได้น้อย ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันอิสระมีค่าประมาณเพียงหนึ่งในสามของน้ำหนักโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลเท่านั้น ดังนั้นการแยกกรดไขมันอิสระด้วยเมมเบรนเซรามิกขนาด 0.3-0.8 ไมครอนจึงทำได้ยาก นอกจากนั้น การลดลงบ้างของกรดไขมันอาจเป็นผลมาจากการสะสมตัวของฟอสโฟไลปิดที่ด้านบน อาจพิจารณาได้ว่าเมมเบรนทั้งสามชนิดกักกันกรดไขมันอิสระได้น้อย ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูพรุนของเมมเบรนเซรามิกใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลกรดไขมันอิสระ ทำให้กรดไขมันอิสระสามารถเข้าสู่กระแสเพอร์มิเอตได้ ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arora S. *et al.*, 2006

ตารางที่ 4.3 การกักกันกรดไขมันอิสระ

เมมเบรน	การกักกัน (%)	
	มิสเซลล์ล่า 1:1	มิสเซลล์ล่า 1:3
M1	2.13	2.64
M2	2.17	2.64
M3	4.35	5.42

4.4 ฟอสโฟไลปิด

ความสามารถการกำจัดฟอสโฟไลปิดออกจากน้ำมันปาล์มดิบของมิสเซลล์ล่า 1:1 และ 1:3 แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ามิสเซลล์ล่า 1:3 สามารถกักกันฟอสโฟไลปิดได้มากกว่ามิสเซลล์ล่า 1:1 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากมิสเซลล์ล่า 1:3 จะเห็นได้ว่าเมมเบรน M1 และ M2 กักกันฟอสโฟไลปิดได้ใกล้เคียงกันคือ 35.38 และ 31.16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนเมมเบรน M3 กักกันฟอสโฟไลปิดได้มากที่สุดคือ 41.46 เปอร์เซ็นต์ และเมมเบรน M3 มีพื้นที่การกรองมากที่สุด หากเปรียบเทียบการกำจัดฟอสโฟไลปิดกับงานวิจัยอื่นๆ จะพบว่าความสามารถการกำจัดฟอสโฟไลปิดมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะชนิดเมมเบรนในงานวิจัยนี้เป็นเมมเบรนเซรามิกเกรดการค้าต้นทุนต่ำ จึงมีคุณภาพที่ด้อยกว่าเมมเบรนเกรดการค้าที่ทำการทดลองในระดับเดียวกัน โดยทั่วไปความสามารถการกำจัดฟอสโฟไลปิดขึ้นกับชนิดเมมเบรน ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลาย และสภาพระบบเช่น พีเอช อุณหภูมิ และความเข้มข้นของน้ำมัน (Lin *et al.*, 1997) นอกเหนือจากข้างต้นแล้ว การฟอร์มตัวไมเซลล์ได้ดีมาน้อยเพียงใดขึ้นกับความเข้มข้นของฟอสโฟไลปิดในน้ำมันปาล์มดิบด้วย

เช่นกัน จากการศึกษาเบื้องต้นโดย Subramanian *et al.* 2001c พบว่าความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ (critical micelle concentration; CMC) ในเทอมของฟอสฟาทีดิลคลอรีนในไตรโอเลอินและในน้ำมันถั่วเหลืองดิบมีค่าเป็น 440 และ 1,020 mg/kg ตามลำดับ ดังนั้นหากความเข้มข้นของฟอสโฟไลปิดในน้ำมันปาล์มดิบมีค่าใกล้เคียงกับ CMC แล้ว ฟอสโฟไลปิดมักจะอยู่ในรูปตัวมันเองมากกว่าจะฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ค่าฟอสโฟไลปิดของสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 82-106 mg/kg ซึ่งมีมากเพียงพอที่ฟอสโฟไลปิดจะฟอร์มตัวเกิดเป็นไมเซลล์กับเฮกเซนได้ดี ดังนั้นมีสเกลล่า 1:3 ให้ผลการทดลองการกำจัดฟอสโฟไลปิดได้ดีกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณเฮกเซนที่มากกว่า ทำให้การฟอร์มตัวของฟอสโฟไลปิดในสารละลายเฮกเซนเกิดได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมีสเกลล่า 1:1 ที่มีการใช้เฮกเซนน้อยกว่า ผลการทดลองของ Gupta A.K., 1986 กล่าวยืนยันถึงการฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์ได้ดีเพียงใด มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกออกจากไตรกลีเซอไรด์ได้ดีมากขึ้น

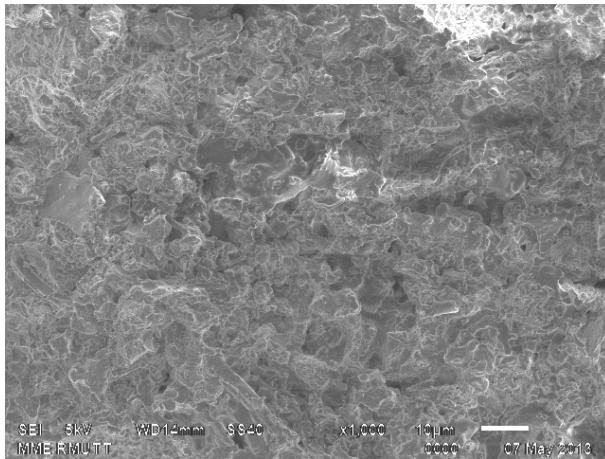
จากข้อมูลที่ได้นั้น อาจกล่าวได้ว่าการเลือกใช้เมมเบรนชนิดเนื้อแน่นน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีหากสารป้อนมีปริมาณฟอสโฟไลปิดไม่มากนัก โดยกลไกการแยกด้วยเมมเบรนเนื้อแน่นเป็นผลมาจากการละลาย-การแพร่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เลือกใช้เมมเบรนเซรามิกที่ใช้ทั่วไปในการกรองน้ำดังนั้นความสามารถในการกำจัดฟอสโฟไลปิดจึงไม่สามารถทำได้มีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.4 ค่าการกักกันฟอสโฟไลปิด

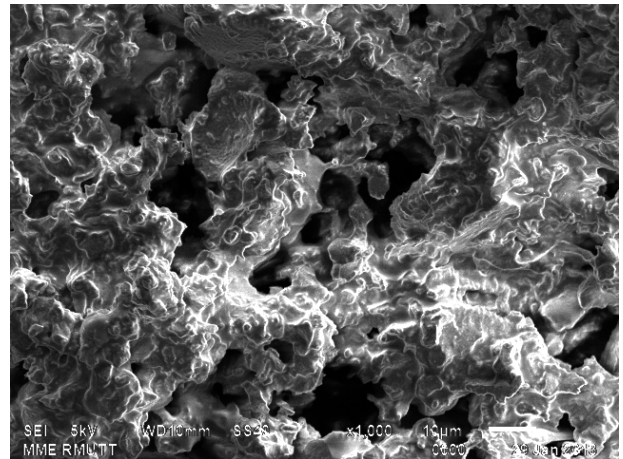
เมมเบรน	การกักกัน (%)	
	มีสเกลล่า 1:1	มีสเกลล่า 1:3
M1	17.92	35.38
M2	14.21	31.16
M3	27.36	41.46

4.5 ผลของเฮกเซนต่อเมมเบรนเซรามิก

จากงานวิจัยนี้ได้มีการผสมเฮกเซนในน้ำมันปาล์มดิบเพื่อเป็นสารป้อน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาโครงสร้างของเมมเบรนเซรามิกทั้งก่อนผ่านการกรองและหลังผ่านการกรอง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy) โดยลักษณะโครงสร้างของเมมเบรนเซรามิกก่อนและหลังการกรองแสดงได้ดังรูป 4.8-4.10 ตามลำดับ ซึ่งสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพได้อย่างชัดเจน

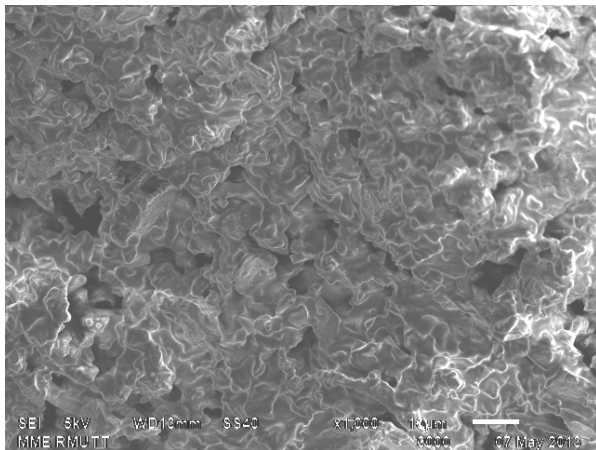


ก.

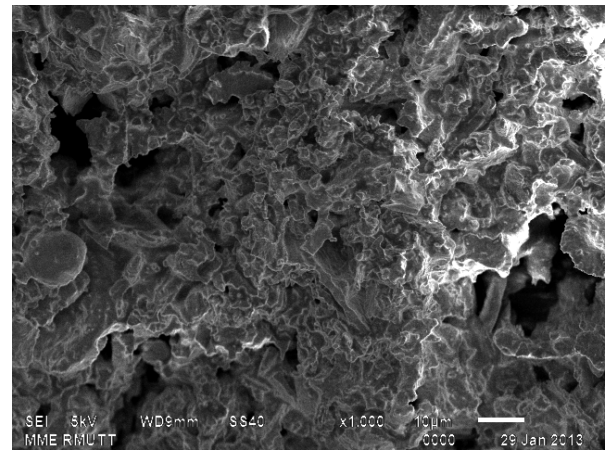


ข.

รูปที่ 4.8 โครงสร้างของเมมเบรนเซรามิก M1 กำลังขยายX1000: ก.ก่อนการกรอง และ ข.หลังผ่านการกรอง

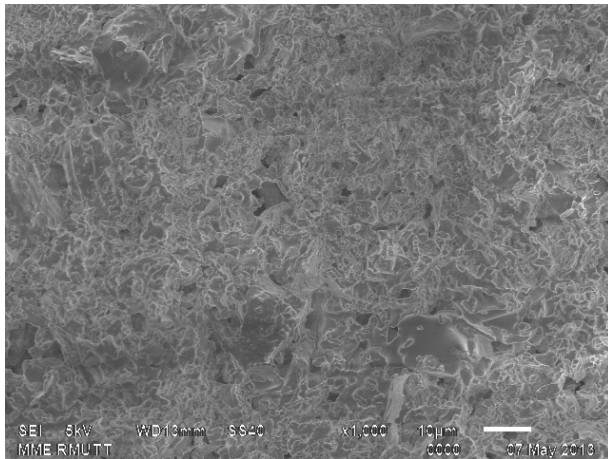


ก.

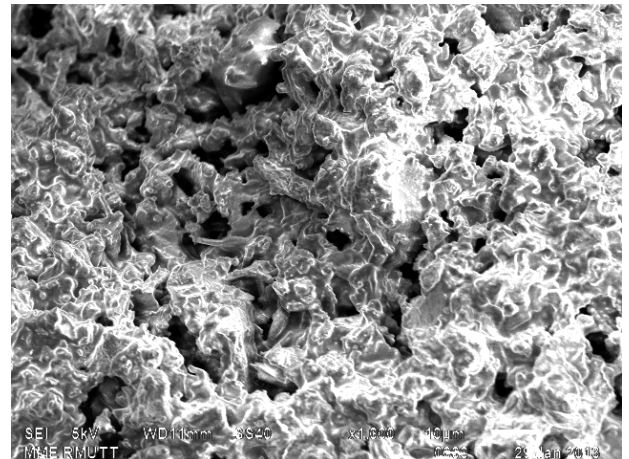


ข.

รูปที่ 4.9 โครงสร้างของเมมเบรนเซรามิก M2 กำลังขยายX1000: ก.ก่อนการกรอง และ ข.หลังผ่านการกรอง



ก.



ข.

รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเมมเบรนเซรามิก M3 กำลังขยายX1000: ก.ก่อนการกรอง และ ข.หลังผ่านการกรอง