การผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

นางสาวเบญจพร มีมุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM FATTY ACID DISTILLATE USING CHITOSAN MEMBRANE REACTOR

Miss Benchaporn Meemuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน
โดย	นางสาวเบญจพร มีมุข
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภา)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

เบญจพร มีมุข: การผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน. (PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM FATTY ACID DISTILLATE USING CHITOSAN MEMBRANE REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ขันทอง สุนทราภา, 78 หน้า.

งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซาน 3 ชนิด ได้แก่ เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่เชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง และเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์ในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนขนาดความจุ 2 ลิตร ที่พัฒนาขึ้นใช้เอง เพื่อดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:8 และ 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด คือ อัตราส่วนระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:9 ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 99.2 ± 0.0, 99.0 ± 0.0 และ 99.1 ± 0.0 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับ 98.6 ± 0.0 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป การเพิ่มแรงขับดันโดยการต่อส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนเข้ากับปั๊มสุญญากาศไม่ได้ช่วยให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระสูงขึ้น เมื่อดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานประเทศไทย และ/หรือ ASTM D6751-02 ยกเว้นปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (93.2 ± 2.2) ซึ่งยังคงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย (ขั้นต่ำ 96.5) เล็กน้อย และค่าความเป็นกรด (3.93 ± 0.0) ที่ยังคงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้งของประเทศไทย (ขั้นสูง 0.5) และ ASTM D6751-02 (ขั้นสูง 0.8)

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2554

5372276423: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CHITOSAN MEMBRANE REACTOR / BIODIESEL / ACID-CATALYZED ESTERIFICATION / PFAD

BENCHAPORN MEEMUK: PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM FATTY ACID DISTILLATE USING CHITOSAN MEMBRANE REACTOR. ADVISOR: ASSOC. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, Ph.D., 78 pp

Symmetric uncrosslinked chitosan membrane, symmetric crosslinked chitosan membrane and chitosan composite membrane on spunbond fabric were used in this study. Membrane reactor with capacity of 2 L was designed and fabricated for operating esterification of PFAD. In this research, the molar ratio of PFAD and methanol of 1:8 and 1:9, the sulfuric acid contents of 1, 2 and 3 wt%, and reaction temperature of 50°C and 60°C were varied. It was found that the optimum condition of all membranes was obtained from the 1:9 ratios reacting with 3 wt% of conc. H_2SO_4 at 60°C for 2 h. The FFA conversion of 99.2 ± 0.0%, 99.0 ± 0.0% and 99.1 ± 0.0%, respectively, compared to the 98.6 ± 0.0% from the conventional reactor were obtained. Providing the driving force of water molecule through connecting the vacuum pump with the downstream of membrane cell was useless, not affecting the FFA conversion. The properties of biodiesel from this study after transesterification were corresponding to Thai standards and/or ASTM D6751-02 except the ester contents and acid value. The ester content of oil from this study was 93.2 ± 2.2 compared to ≥ 96.5 of Thai Standard. The acid value of oil from this study was 3.93 ± 0.0 compared to ≤ 0.5 of Thai Standard and ≤ 0.8 of ASTM D6751-02.

Department : Chemical Technology Student's Signature ....

Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature ....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนการศึกษาจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเมมเบรนเพื่อการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์การวิเคราะห์สมบัติความชอบน้ำของเมมเบรน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สารไนโตรเจนเหลว

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกสำหรับการใช้เครื่องมือในการทดลองและห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ

กิตติกรรมประกาศ.. ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญตาราง.. ญ

สารบัญภาพ.. ฏ

บทที่

1 บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.. 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.. 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 2

1.4 ขอบเขตงานวิจัย.. 2

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 3

2.1 ไบโอดีเซล.. 3

2.1.1 ประเภทของไบโอดีเซล.. 3

2.1.2 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล.. 4

2.1.3 สมบัติของไบโอดีเซล.. 7

2.2 ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม.. 13

2.3 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน.. 14

2.4 การแบ่งชนิดของเมมเบรน.. 15

2.4.1 เมมเบรนแบบเนื้อแน่น.. 16

2.4.2 เมมเบรนรูพรุน.. 16

2.4.3 เมมเบรนสมมาตร/ไม่สมมาตร.. 16

2.4.4 เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน.. 17

2.5 ความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ.. 17

2.6 ไคโตซาน.. 18

บทที่		หน้า
	2.6.1 โครงสร้างทางเคมี	18
	2.6.2 สมบัติทางกายภาพ	18
	2.7 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน	20
	2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง	24
	3.1 สารเคมีที่ใช้	24
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	24
	3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	25
	3.4 การทดสอบลักษณะสมบัติของเมมเบรน	25
	3.4.1 ความสามารถทนต่อแรงดึง	25
	3.4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา	27
	3.4.3 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน	27
	3.4.4 ความชอบน้ำของเมมเบรน	27
	3.4.5 ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์	27
	3.4.6 ความสามารถในการกักดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล	29
	3.5 การออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ Stirred cell reactor	29
	3.6 การผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม	30
	3.7 การวิเคราะห์ไบโอดีเซล	32
	3.7.1 การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ	32
	3.7.2 การหาร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์	33
	3.7.3 การทดสอบสมบัติของไบโอดีเซล	33
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	34
	4.1 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติของเมมเบรน	34
	4.1.1 ผลการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึง	34
	4.1.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา	36
	4.1.3 ผลของปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน	36
	4.1.4 ผลการทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรน	38

บทที่		หน้า
	4.1.5 ผลการทดสอบความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์............................	39
	4.1.6 ความสามารถในการกักดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล...........	40
	4.2 ผลการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน........	41
	4.2.1 ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อ เมทานอล..	41
	4.2.2 ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริก..	44
	4.2.3 ผลของอุณหภูมิ..	44
	4.3 ผลของการต่อท้ายเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนด้วยระบบสุญญากาศ………………	47
	4.3.1 ผลของ Time lag..	48
	4.3.2 ผลของระดับสุญญากาศท้ายเมมเบรน..	48
	4.4 ผลการดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน..	50
	4.5 สมบัติของไบโอดีเซล..	50
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..	52
	5.1สรุปผลการวิจัย..	52
	5.1.1 ผลการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ เมมเบรนไคโตซาน..	52
	5.1.2 ผลที่ได้จากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด..	53
	5.2 ข้อเสนอแนะ..	53
รายการอ้างอิง	....	54
ภาคผนวก	....	58
	ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สมบัติไบโอดีเซล...	59
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ..	65
	ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง...	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล	8
2.2	ข้อกำหนดสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบในประเทศไทย	8
2.3	แสดงประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน	15
4.1	แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรน	35
4.2	แสดงปริมาณการดูดซับน้ำและมุมสัมผัสของเมมเบรน	38
4.3	แสดงค่าร้อยละการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล	40
4.4	เปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด	47
4.5	เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 และ ตอนที่ 2	50
4.6	แสดงสมบัติของไบโอดีเซล	51

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล........	5
2.2	แสดงกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม...	13
2.3	หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน..	14
2.4	แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน...	18
3.1	เครื่อง Universal Testing : LLOYD Instruments LR 5K...........................	26
3.2	ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต...........	26
3.3	ชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบ...	28
3.4	เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน (ก) แบบจำลอง (ข) ใช้งานจริง.................	30
3.5	เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ..........................	32
4.1	ลักษณะของเมมเบรนไคโตซาน..	34
4.2	ภาคตัดขวาง SEM ของเมมเบรนไคโตซาน..	37
4.3	ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรที่ไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวาง..	39
4.4	ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง...	42
4.5	ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง...	42
4.6	ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต...	43
4.7	เปรียบเทียบผลของการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด........	43
4.8	เปรียบเทียบผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด..	45
4.9	เปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด..	46
4.10	ผลของ Time lag ต่อร้อยละการเปลี่ยนของ FFA..	49
4.11	ผลของระดับสุญญากาศต่อร้อยละการเปลี่ยนของ FFA..............................	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซล (biodiesel) เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลและได้รับความสนใจมากในปัจจุบันนี้ เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบภายในประเทศ มีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซลจากแหล่งปิโตรเลียม สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ ราคาถูก ช่วยลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมดิบจากต่างประเทศและลดมลพิษในอากาศ เนื่องจากในไบโอดีเซลไม่มีส่วนประกอบของซัลเฟอร์และสารประกอบแอโรแมติก [1, 2] โดยส่วนใหญ่ไบโอ-ดีเซลนิยมผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขสัตว์ผ่านทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) กับแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็กโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส [3] ไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชมีความบริสุทธิ์สูงแต่มีราคาสูงกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม จึงสนใจวัตถุดิบที่มีราคาต่ำซึ่งมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม

ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม (Palm fatty acid distillate หรือ PFAD) คือ ผลผลิตพลอยได้ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันอิสระร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 87.1±1.3% [4] จึงต้องเปลี่ยนกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid; FFA) ใน PFAD เป็นแอลคิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ (1.1) ก่อน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสบู่จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ (1.2) มากเกินไป ซึ่งยากต่อการกำจัดออก

$$\text{R-COOH} + CH_3OH \xrightleftharpoons{H^+} \text{R-COOCH}_3 + H_2O \qquad (1.1)$$

กรดไขมันอิสระ เมทานอล เมทิลเอสเทอร์ น้ำ

$$R_1\text{-COOH} + NaOH \longrightarrow R_1COONa + H_2O \qquad (1.2)$$

กรดไขมันอิสระ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สบู่ น้ำ

อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน คือ เมทิลเอสเทอร์และน้ำ หากมีปริมาณน้ำเกิดขึ้นมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ลดลง [5] เพื่อให้

ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ผลิตภัณฑ์น้ำต้องถูกกำจัดออกระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มผ่านกระบวนการเอสเทอ-ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานซึ่งเป็นเมมเบรนชอบน้ำ โดยมีสมมติฐานว่าเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานสามารถแยกน้ำออกจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลได้ของไบโอดีเซลและความสามารถในการแยกน้ำจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานเพื่อการผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มกับเมทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แบบ Batch ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดระดับห้องทดลอง
2. ใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันพร้อมกับการแยกน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยา เพื่อให้สมดุลปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

สามารถกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนทำให้ได้ผลได้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก นอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยมีสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียมมาก และสามารถใช้ทดแทนกันได้ ดังนั้นไบโอดีเซลจึงเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และเมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์พบว่าสามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลแบบเดิมได้ นอกจากนี้การใช้ไบโอดีเซลยังมีข้อดีกว่าการใช้น้ำมันดีเซลคือไบโอดีเซลมีค่าจุดวาบไฟมากกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน รวมทั้งไบโอดีเซลมีค่าการหล่อลื่นสูงซึ่งจะทำให้เครื่องยนต์อายุยืนยาวขึ้นและลดความถี่ในการเปลี่ยนอะไหล่เครื่องยนต์ [6]

2.1.1 **ประเภทของไบโอดีเซล** [7]

แบ่งเป็น 3 ประเภท

1. **น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์** ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชแท้ ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง หรือน้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เลยโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่น ๆ ไม่ต้องนำมาแปลงสมบัติของน้ำมันอีก
2. **ไบโอดีเซลแบบลูกผสม** ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด
3. **ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์** ไบโอดีเซลประเภทนี้มีกระบวนการที่ยุ่งยากมาก โดยส่วนใหญ่ผลิตผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification) คือ การนำน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้เอสเทอร์ ไบโอดีเซลเอสเทอร์มีสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด และให้การ

เผาไหม้ที่สะอาดกว่า ไอเสียมีคุณภาพดีกว่าเพราะออกซิเจนให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล จึงทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย และในไบโอดีเซลเอสเทอร์ไม่มีกำมะถัน จึงไม่มีปัญหาเรื่องซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อย จึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย และยังช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์ได้อีกด้วย

2.1.2 **เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล**

2.1.2.1 **การใช้โดยตรงและการผสม**

การใช้โดยตรงคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแท้ ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยไม่ต้องผสมหรือผสมสารเคมีอื่นและไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำมัน ส่วนแบบผสมคือเป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลหรืออื่น ๆ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด [8]

2.1.2.2 **ไมโครอิมัลชัน**

ไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในภาวะสมดุลโดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากอยู่ในช่วง 1- 150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มีค่าความหนืดลดลง ไมโครอิมัลชันที่เกิดจากเมทานอลกับน้ำมันพืชจะได้น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่เมื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่ามีการสะสมตัวของคราบซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน เกาะรอบ ๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้

2.1.2.3 **กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน** (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งชนิด โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 45-850 องศาเซลเซียส [9] สารประกอบที่ผ่าน

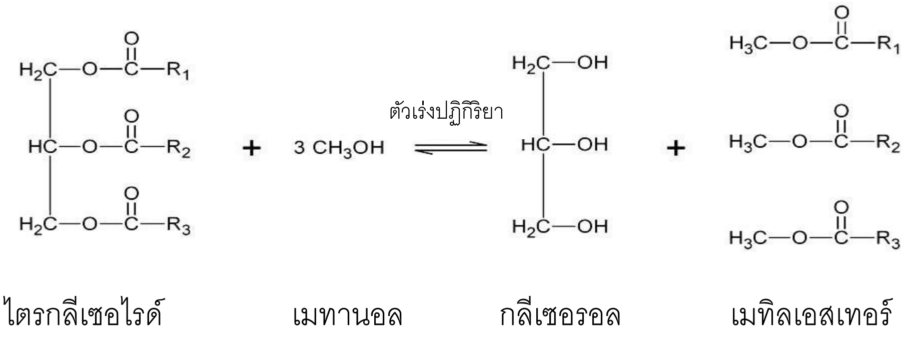
กระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการเนื่องด้วยความหลากหลายทางปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

2.1.2.4 **การทำปฏิกิริยากับเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต**

เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีนี้เป็นการนำเอาน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในภาวะเหนือวิกฤต ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยพร้อมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ไม่มีของเสียจากกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันในระดับที่สูง [8]

2.1.2.5 **ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน** (Transesterification) [10]

ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน หรือแอลกอฮอไลซิส (alcoholysis) เป็นปฏิกิริยาเปลี่ยนโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นเอสเทอร์ตัวใหม่ หรือ โมโนแอลคิลเอสเทอร์ (mono-alkyl ester) และกลีเซอรอล โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โมเลกุลขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล

ในภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสามารถเกิดได้ที่ความดันบรรยากาศตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงจุดเดือดของแอลกอฮอล์ (ประมาณ 65 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โดยทั่วไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (homogeneous catalyst) ซึ่งแบ่ง

ออกเป็นสองชนิด คือ กรดและเบส โรงงานผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดในปัจจุบันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เบสจะเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ใช้ปริมาณเมทานอลน้อยกว่า และใช้ระยะเวลาสั้นกว่าประมาณ 5 นาทีจนถึงประมาณ 1 ชั่วโมง ขึ้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้น การกวนผสม และอัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมมากกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูก วัตถุดิบน้ำมันเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการเร่งด้วยเบสต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) และน้ำต่ำ โดยต้องควบคุมให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอาจทำโดยการเปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (หัวข้อที่ 2.1.2.6) ไม่เช่นนั้นแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะทำปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (saponification) กับกรดไขมันอิสระเกิดเป็นสบู่ขึ้น [11] ดังสมการที่ 2.1

$$R_1\text{-COOH} + \text{NaOH} \longrightarrow R_1\text{COONa} + H_2O \qquad (2.1)$$

กรดไขมันอิสระ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สบู่ น้ำ

2.1.2.6 **เอสเทอริฟิเคชัน** (Esterification)

เนื่องจากในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเบส จำเป็นต้องควบคุมปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันให้ต่ำกว่าร้อยละ 1 [1,12] ดังนั้นในกระบวนการที่ใช้วัตถุดิบราคาถูกและมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เช่น ไขมันสัตว์ น้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง จำเป็นต้องมีขั้นตอนการกำจัดกรดไขมันอิสระออก การทำเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชด้วยแอลกอฮอล์โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งนิยมใช้กรดซัลฟิวริก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และน้ำ ดังสมการที่ 2.2

(2.2)

กรดไขมันอิสระ เมทานอล เมทิลเอสเทอร์ น้ำ

2.1.3 สมบัติของไบโอดีเซล

เนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งสมบัติบางข้อเป็นข้อได้เปรียบและบางข้อเป็นข้อเสียเปรียบ โดยทั่วไปแล้วสามารถเปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลได้ดังนี้ [13]

1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้ว กำมะถันในน้ำมันดีเซลจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถันตามลำดับ เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ เมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษเหล่านี้เกิดเป็นฝนกรดได้

2. ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ช้ากว่าน้ำมันดีเซลทำให้มีความปลอดภัยในการขนส่งมากกว่า

3. น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียร เกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล และมีระยะการเก็บรักษาหลังการผลิตสั้นกว่าน้ำมันดีเซล

4. ไบโอดีเซลมีสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล [14]

สมบัติ	น้ำมันดีเซล ASTM D975	ไบโอดีเซล ASTM D6751
องค์ประกอบ	ไฮโดรคาร์บอน (C_{10}-C_{21})	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (C_{12}-C_{22})
ความหนืด (mm^2/s)	1.9-4.1 ที่ 40°C	1.9-6.0 ที่ 40°C
ความถ่วงจำเพาะ	0.85	0.88
จุดวาบไฟ (°C)	60-80	100-170
ปริมาณน้ำ (%)	0.05	0.05
ปริมาณคาร์บอน (%)	87	77
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	13	12
ปริมาณออกซิเจน (%)	0	11
ปริมาณกำมะถัน (%)	0.05	0.05
ดัชนีซีเทน	40-55	48-60

มาตรฐานและวิธีการตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของไบโอดีเซลเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ของกรดไขมันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบในประเทศไทย [15]

สมบัติ	หน่วยวัด	ข้อกำหนดขั้นต่ำ	ข้อกำหนดขั้นสูง	วิธีทดสอบ
เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	96.5	-	EN 14103
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	860	900	ASTM D 1298
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	เซนติสโตกส์	3.5	5.0	ASTM D 445
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	120	-	ASTM D 93
กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.0010	ASTM D 2622

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบในประเทศไทย (ต่อ)

สมบัติ	หน่วยวัด	ข้อกำหนดขั้นต่ำ	ข้อกำหนดขั้นสูง	วิธีทดสอบ
กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.30	ASTM D 4530
จำนวนซีเทน	-	51	-	ASTM D 613
เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.02	ASTM D 874
น้ำ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.050	ASTM D 2709
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.0024	ASTM D 5452
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	-	-	หมายเลข 1	ASTM D 130
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	ชั่วโมง	10	-	EN 14112
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮ-ดรอกไซด์ต่อกรัม	-	0.5	ASTM D 664
ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม	-	120	EN 14111
กรดลิโนเลนิกเมทิล-เอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	12.0	EN 14103
เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.20	EN 14110
โมโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.80	EN 14105
ไดกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.20	EN 14105
ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.20	EN 14105
ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	0.0010	ASTM D 4951

1. เมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในไบโอ-ดีเซล สามารถหาได้โดยวิธีโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส (Gas chromatography) ซึ่งสอดคล้องตามมาตรฐาน EN 14103 [16]

2. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน [13]

3. ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดต่ำเป็นสาเหตุให้เกิดการรั่วในระบบเชื้อเพลิง ซึ่งความหนืดของน้ำมันมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซล คือ ถ้าสายโซ่คาร์บอนยาวขึ้นส่งผลให้ความหนืดในน้ำมันเพิ่มขึ้น [17]

4. จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ จุดวาบไฟมีความเกี่ยวข้องกับการระเหยของน้ำมันซึ่งส่งผลต่อการสตาร์ทเครื่องยนต์ [18] มาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่งเคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.2 ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

5. กำมะถัน

โดยปกติองค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้ จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่สำหรับไบโอดีเซลมีปริมาณกำมะถันต่ำมากหรือแทบไม่มีเลย ดังนั้นการใช้ไบโอ-ดีเซลแทนดีเซลจึงสามารถลดการปล่อยกำมะถันได้

6. กากถ่าน

ปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล [18] หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด ชี้บอกถึงยังคงมีสารต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง [13]

7. ค่าซีเทน

ค่าซีเทนแสดงถึงคุณภาพการจุดติดไฟ (Ignition Quality) นับตั้งแต่น้ำมันเริ่มถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้จนกระทั่งน้ำมันเกิดติดไฟขึ้น ช่วงระยะเวลานี้เรียกว่า ความล่าช้าในการจุดติดไฟ (Ignition Lag) น้ำมันที่มีช่วงระยะเวลานี้สั้นจะมีค่าซีเทนสูง จุดติดไฟได้ง่าย เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่าย [19]

8. เถ้าซัลเฟต

เถ้าซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์ [13]

9. น้ำ

การมีน้ำในไบโอดีเซลปริมาณมากทำให้เกิดปัญหาในหลายด้าน เช่น เกิดการกัดกร่อนส่วนประกอบในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน [20]

10. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

การกัดกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ [13]

11. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเกิดสารประเภท เปอร์ออกไซด์ (peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบ-โอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ (oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซล [13]

12. ค่าความเป็นกรด

แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง [13,16]

13. ค่าไอโอดีน

ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่นซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไขหรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งส่งผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น [13]

14. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิ-เมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง [13]

15. เมทานอล

เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อน ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล ส่งผลทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลง [13]

16. โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

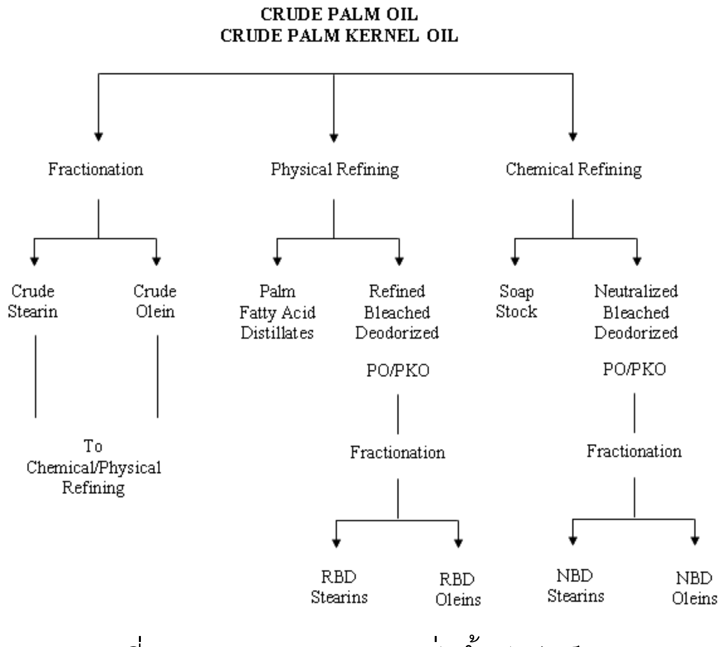
ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์ [13,16]

17. ฟอสฟอรัส

ถ้าไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วยต้องทำการกำจัดออก หากไม่กำจัดออกจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์คะตะไลติกส์คอนเวอเตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการปล่อยมลพิษ [13]

2.2 **ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม** (Palm fatty acid distillate, PFAD)

PFAD คือ ผลผลิตพลอยได้ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปาล์ม พบว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกลั่นบริสุทธิ์ด้วยวิธีทางกายภาพแล้วเกิดการแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และส่วนที่สองเป็น PFAD [21] ดังภาพที่ 2.2 โดยทั่วไป PFAD ถูกใช้เป็นอาหารสัตว์และใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ ซึ่ง PFAD ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ 87.1±1.3% ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้



ภาพที่ 2.2 แสดงกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม [21]

2.3 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [22]

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนเพื่อแยกสาร เพิ่มความเข้มข้น และทำให้บริสุทธิ์ได้พร้อมกัน เมมเบรนเป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหล 2 เฟส ที่มีสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่านได้โดยการถ่ายโอนมวลทั้งหมดเกิดขึ้นที่ด้านความหนาของเมมเบรนซึ่งมีขนาดมิติ (Dimension) น้อยกว่าด้านกว้าง-ยาวมาก ๆ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนมีหลักการดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยมีสารป้อน (Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเมมเบรน ส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) และส่วนของสารป้อนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า รีเทนเทต (Retentate) แรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น แรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นต้น ตามประเภทของกระบวนการ วัสดุที่นำมาทำเป็นเมมเบรนอาจเป็น พอลิเมอร์ เซรามิกส์ คาร์บอน ซีโอไลต์ ออกไซด์ต่าง ๆ โลหะ หรือ ของเหลว

เมมเบรนที่มีสมรรถนะสูง คือ เมมเบรนที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

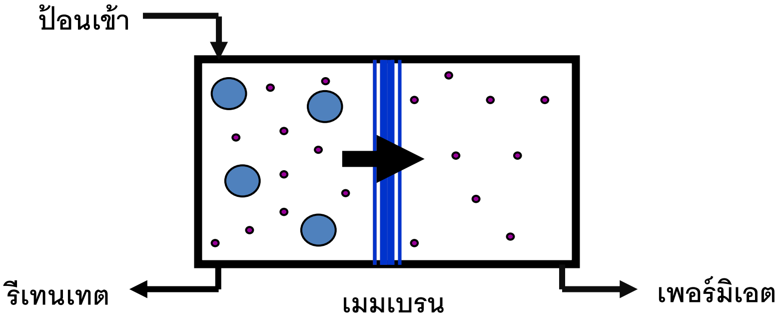
(ก) มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง

(ข) มีความแข็งแรงเชิงกล

(ค) ทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้ภาวะการดำเนินการได้

(ง) มีแนวโน้มจับสิ่งสกปรกไว้ที่ผิวได้ต่ำ

(จ) ราคาไม่แพง



ภาพที่ 2.3 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน

สำหรับลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2.3 โดยจะมีสารป้อนและเพอร์มิเอตที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.3 แสดงประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [22]

กระบวนการ	สารป้อน	เพอร์มิเอต	แรงขับ
ไมโครฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
อัลตราฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
นาโนฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
ออสโมซิสแบบผันกลับ	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
เพอร์แวปเพอเรชัน	ของเหลว	ไอ	ความดันย่อย
เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน	ของเหลว หรือ $[H^{+}(H_2O)_n]$	ของเหลว หรือ $[H^{+}(H_2O)_n]$	แรงเคลื่อนไฟฟ้า
แยกแก๊สด้วยเมมเบรน	แก๊ส	แก๊ส	ความดันย่อย

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ สารป้อนและเพอร์มิเอตอยู่ในเฟสของเหลว ใช้ความดันเป็นแรงขับดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลขึ้น ขณะที่สารป้อนในกระบวนการเพอร์แวปเพอเรชันเป็นของเหลวและเพอร์มิเอตอยู่ในเฟสไอ มีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอตเป็นแรงขับดัน สารป้อนและเพอร์มิเอตในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นของเหลว หรืออยู่ในรูปของไฮโดรเนียมไอออน $[H^{+}(H_2O)_n]$ ในกรณีการประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิงใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นแรงขับ ส่วนสารป้อนและเพอร์มิเอตในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนอยู่ในเฟสแก๊สและมีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอตเป็นแรงขับ

2.4 **การแบ่งชนิดของเมมเบรน** [23]

การแบ่งชนิดของเมมเบรนที่ทำให้เห็นความแตกต่างทางกายภายและการใช้งานของเมมเบรนได้อย่างชัดเจน คือ การแบ่งชนิดตามโครงสร้าง และกลไกในการแยก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ เมมเบรนแบบเนื้อแน่น (Dense membrane) เมมเบรนรูพรุน (Porous membrane)

เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange membrane) และเมมเบรนสมมาตร/ไม่สมมาตร (Symmetric/asymmetric membrane)

2.4.1 เมมเบรนแบบเนื้อแน่น คือเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของเนื้อพอลิเมอร์สูง และมีช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์อยู่น้อย (น้อยกว่าร้อยละ 40) หรือมีช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ขนาดเล็กกว่า 5 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การซึมผ่านของสารอาศัยการถ่ายโอนโดยการแพร่ภายใต้แรงขับดันจากความดัน ความเข้มข้นหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า สมบัติที่สำคัญของเมมเบรนแบบเนื้อแน่น คือการแยกของสารที่มีขนาดเท่ากันอาจเกิดจากสภาพการละลายของสารในวัสดุที่นำมาผลิตเป็นเมมเบรนได้แตกต่างกัน เมมเบรนแบบเนื้อแน่นนี้นิยมนำมาใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ นาโนฟิลเตรชัน และเพอร์แวปพอเรชัน มักมีการทำให้เกิดโครงสร้างแบบไม่สมมาตรเพื่อทำให้ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น

2.4.2 เมมเบรนรูพรุน คือเมมเบรนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและทำหน้าที่เหมือนกับการกรอง โดยทั่วไปความหมายของคำว่ารูพรุน ตามคำจำกัดความของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ได้แบ่งรูพรุนออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ขนาดใหญ่ : ขนาดรูพรุน > 50 นาโนเมตร

ขนาดกลาง : 2 นาโนเมตร < ขนาดรูพรุน < 50 นาโนเมตร

ขนาดเล็ก : ขนาดรูพรุน < 2 นาโนเมตร

อนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนถูกกันออกไปทั้งหมด แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนสามารถผ่านออกไปได้เพียงบางส่วน อย่างไรก็ตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่เล็กที่สุดสามารถผ่านทะลุเมมเบรนชนิดนี้ได้ ดังนั้นการแยกตัวด้วยเมมเบรนรูพรุน จึงเกิดจากกลไกการคัดขนาดของโมเลกุลและการกระจายขนาดรูพรุนของเมมเบรน

2.4.3 เมมเบรนสมมาตร/ไม่สมมาตร

เมมเบรนสมมาตร คือเมมเบรนที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอหรือเหมือนกันตลอดชั้นความหนา ส่วนเมมเบรนไม่สมมาตร คือเมมเบรนที่มีชั้นผิวเนื้อแน่นกว่าชั้นล่าง ชั้นผิวทำหน้าที่ในการกักกันสาร ส่วนโครงสร้างชั้นล่างทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้แก่เมมเบรน เมมเบรนแบบไม่สมมาตรสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.4.3.1 เมมเบรนที่มีชั้นผิว (Skinned membrane) โดยที่ชั้นผิวและชั้นล่างเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

2.4.3.2 เมมเบรนเชิงประกอบ (Composite membrane) เป็นเมมเบรนที่ชั้นผิวกับชั้นล่างเป็นวัสดุต่างชนิดกัน

2.4.4 เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน คือเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่มีประจุ มีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกหรือไอออนลบ สามารถเป็นได้ทั้งเมมเบรนแบบเนื้อแน่นหรือแบบรูพรุน แต่ส่วนใหญ่เป็นแบบรูพรุน ที่ผนังของรูพรุนมีประจุของไอออนบวกหรือลบยึดติดอยู่ หลักการทำงานของเมมเบรน คือการกีดกันไอออนที่มีประจุชนิดเดียวกับประจุที่ยึดติดอยู่กับเมมเบรนออกไป การแยกที่เกิดขึ้นมีผลมาจากประจุและความเข้มข้นของไอออน เมมเบรนประจุไฟฟ้ามักนำมาใช้แยกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในกระบวนการอิเล็กโทรไดแอลิซิส

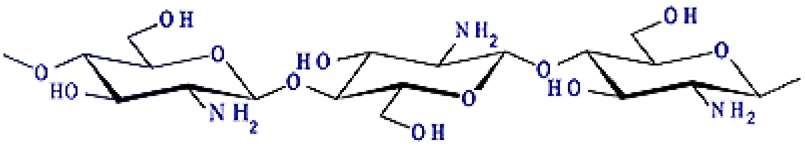
2.5 **ความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ** (Hydrophilicity and Hydrophobicity) [22]

เมื่อเมมเบรนสัมผัสกับน้ำจะแสดงการตอบสนองต่อโมเลกุลน้ำในลักษณะชอบโดยการสร้างพันธะกับโมเลกุลน้ำหรือไม่ชอบโดยการผลักโมเลกุลน้ำให้ห่างออกไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ เมมเบรนที่มีสมบัติชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเมมเบรนกับเส้นสัมผัสหยดน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 90 องศา โดยค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่า แสดงว่าสามารถทำให้เมมเบรนเปียกน้ำได้มากขึ้น เมมเบรนที่ชอบน้ำมากๆ จะทำให้โมเลกุลน้ำมารวมกันเกิดเป็นชั้นน้ำบริสุทธิ์ที่ผิวหน้าของเมมเบรนขณะเดียวกันจะผลักโมเลกุลของสารอื่นให้ห่างออกไปจากผิวหน้าของเมมเบรน จึงเกิดการถ่ายโอนเฉพาะโมเลกุลน้ำผ่านเมม - เบรนออกไปทางรูพรุน ในกรณีของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นจะเกิดการดูดซับโมเลกุลน้ำเข้าไปในเนื้อเมมเบรนและแพร่ผ่านเมมเบรนออกไปยังอีกด้านหนึ่งด้วยกลไกที่เรียกว่า “การละลาย-การแพร่” เมมเบรนที่มีกลุ่มว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active group) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำได้จะมีสมบัติความชอบน้ำสูง โดยพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจาก Activated hydrogen บนเมมเบรนกับอะตอมออกซิเจนของน้ำจะมีเสถียรภาพสูงกว่าพันธะที่เกิดจาก Activated oxygen บนเมมเบรนกับอะตอมไฮโดรเจนของน้ำ

2.6 ไคโตซาน

ไคโตซานคือสารที่สกัดได้จากเปลือกกุ้ง-เปลือกหอยจึงทำให้มีราคาถูก และเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติจึงไม่มีความเป็นพิษ [24]

2.6.1 โครงสร้างทางเคมี [24]



ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่อะมิโน (-NH_2) ซึ่งทั้งสองหมู่นี้ทำให้เมมเบรนไคโตซานมีสมบัติความชอบน้ำสูง

2.6.2 สมบัติทางกายภาพ [25]

1. การละลาย

การละลายเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของสารกับตัวทำละลาย ดังนั้น ประเด็นที่สำคัญที่จะทำให้พอลิเมอร์หนึ่ง ๆ ละลายได้ดี จึงขึ้นอยู่กับการยอมให้โมเลกุลของตัวทำละลายแทรกผ่านเข้าไปในระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์นั่นเอง ไคโตซานมีโครงสร้างที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ดังนั้นโมเลกุลของตัวทำละลายจึงไม่สามารถแทรกผ่านและทำพันธะกับสายโซ่ของไคโตซานได้ เราจึงพบว่าไคโตซานจะไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป และบ่อยครั้งที่สารจะบวมหรือพองตัวในตัวทำละลายเท่านั้น แต่ไม่ละลายอย่างสมบูรณ์ ตัวทำละลายที่ดีสำหรับไคโตซาน จึงอาศัยหลักการที่จะทำให้เกิดพันธะไอออนไปทดแทนที่ตำแหน่งไฮโดรเจน เช่น ที่ตำแหน่งอะมิโน เมื่อตำแหน่งดังกล่าวกลายเป็นไอออนบวก (Protonation) แล้ว พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายและไอออนบวกจะสร้างพันธะไอออนกับไอออนลบในระบบตัวทำละลาย การละลายจึงเกิดขึ้น ด้วยหลักการดังกล่าว ในกรณีของ

ไคโตซาน ตัวทำละลายที่รู้จักกันดีคือ กรดมด และกรดแอซีติก ทั้งนี้เนื่องจากกรดดังกล่าวสามารถแตกตัวทำให้หมู่อะมิโนเป็นไอออนบวก และสามารถสร้างพันธะไอออนกับไอออนลบที่แตกตัวอยู่ในกรด นอกจากนี้กรดทั้งสองประเภทยังไม่ทำลายโครงสร้างของไคโตซาน หาง่าย และราคาถูก จึงเป็นตัวทำละลายที่ใช้อย่างแพร่หลายและเหมาะสำหรับการเตรียมไคโตซานเป็นชิ้นงานอื่น ๆ โดยกระบวนการปรับโครงสร้างทางกายภาพ เช่น จากสารละลายไคโตซาน เราสามารถขึ้นรูปเป็นเจลบีดส์ หรือเมมเบรนได้ กรดอนินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนทริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเพอร์คลอริก และกรดฟอสมิก สามารถละลายไคโตซานได้เช่นกัน แต่ภายใต้อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามในบางครั้ง อาจตกตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น เนื่องจากการละลายที่ไม่สมบูรณ์

2. ความหนืด

การไหลของพอลิเมอร์เป็นตัวชี้วัดขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ หากสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีความยาว (ซึ่งนั่นก็คือ Degree of polymerization) มากจะแสดงสมบัติการไหลที่ช้า ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเตรียมสารละลายของพอลิเมอร์ประเภทนั้น ๆ สารละลายจะมีความหนืดสูงผันแปรไปตามมวลโมเลกุล (Molecular weight)

สำหรับความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ร้อยละการกำจัดหมู่แอซีทิล มวลโมเลกุล ความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดแอซีติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น

3. สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนเป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงความเสถียรของไคโตซาน เมื่อพิจารณาไคโตซานเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ประเภทหนึ่งแล้ว ไคโตซานจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง จึงควรแสดงสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งจะให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) เมื่อให้ความร้อนแก่ไคโตซานจนถึงระดับหนึ่งแต่ในความเป็นจริงเมื่อให้ความร้อนแก่ไคโตซาน จะพบว่าไคโตซานจะไม่แปรสภาพเป็นสารหนืด แต่จะไหม้และสลายไปในที่สุด

2.7 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน

เทคโนโลยีการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนมีข้อดีเหนือกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป ดังนี้ [26]

(ก) เป็นการรวมกันของขั้นตอนการทำปฏิกิริยาและขั้นตอนการแยกในหนึ่งกระบวนการ ส่งผลให้ในกระบวนการผลิตมีการใช้จำนวนเครื่องมือหรืออุปกรณ์น้อยลง ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดต่ำลง

(ข) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านอุณหพลศาสตร์หรือกำจัดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ส่งผลทำให้ได้ค่าการเปลี่ยน (Conversion) ที่สูงขึ้น

(ค) สามารถควบคุมความไม่เข้ากันของสารตั้งต้นและกำจัดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการได้

ในทางอุดมคติระบบเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนจะเป็นการแยกส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสารตั้งต้นจะถูกเก็บไว้ในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลานานและผลิตภัณฑ์จะถูกกำจัดจากเครื่องปฏิกรณ์ออกมาอยู่ในส่วนเพอร์มิเอต [27] เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนอย่างแท้จริงแล้ว พบว่ามีความง่ายต่อการดำเนินงานและมีความยืดหยุ่นสูง มีความสามารถในการคัดเลือกและความสามารถในการซึมผ่านสูง มีความต้องการพลังงานต่ำ มีเสถียรภาพที่ดีภายใต้ภาวะการทำงานที่เหมาะสม เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ง่ายต่อการควบคุมและสามารถประยุกต์ใช้ในการทำงานได้หลากหลาย เช่น การแยกโมเลกุลของสาร การแยกส่วน ความเข้มข้นและการทำให้มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น [28]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dubé และคณะ [26] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนลาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนคาร์บอน เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยา (ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลในเมทานอล) ออกจากวัตถุดิบน้ำมันคาโนลา โดยเลือกใช้เมมเบรนคาร์บอนเพราะเมมเบรนคาร์บอนมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและสารเคมี ในการทดลองดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งชนิดกรด (กรดซัลฟิวริก) และชนิดเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ในลักษณะการทำงานแบบกึ่งกะ (semi-batch) ที่อุณหภูมิ 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของสารป้อน (เมทานอลต่อน้ำมัน) ทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนของน้ำมันไปเป็นไบโอ-

ดีเซลเพิ่มขึ้น การใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนตามงานวิจัยนี้ทำให้เกิดการแยกผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาออกจากน้ำมันคาโนลาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเป็นผลให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูงและทำให้สมดุลปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า เนื่องมาจากการไม่ผสมเข้ากันของน้ำมันคาโนลากับเมทานอลทำให้น้ำมันคาโนลาอยู่ในสภาพอิมัลชันแขวนลอยอยู่ในเมทานอลแล้วเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ผิวของหยดน้ำมันเกิดเป็นไบโอดีเซลที่ละลายได้ในเมทานอลซึ่งสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของเมมเบรนคาร์บอนไปได้ แต่หยดน้ำมันคาโนลามีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจึงถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในเมทานอลซึ่งประกอบด้วยไบโอดีเซล กลีเซอรอล และตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาผลการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าการเปลี่ยนร้อยละ 98 สูงกว่าเมื่อใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้ค่าการเปลี่ยนเท่ากับร้อยละ 90 แต่การใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้กรดไขมันอิสระในวัตถุดิบกลายเป็นสบู่แทนที่จะเป็นไบโอดีเซล ขณะที่ไม่เกิดสบู่ขึ้นในกรณีใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับวัตถุดิบที่มีราคาถูกแต่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ

Malaya และคณะ [29] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันอิสระปริมาณสูงได้แก่น้ำมันจากหยีน้ำ (Karanja) ซึ่งประกอบด้วยปริมาณกรดไขมันอิสระสูงกว่าร้อยละ 20 ขั้นตอนแรกทำปฏิกิริยาผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5 อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (โมล:โมล) เท่ากับ 6 : 1 และขั้นตอนต่อมาคือดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าผลได้ของไบโอดีเซลที่ผลิตจากหยีน้ำ ซึ่งผ่านกระบวนการสองขั้นตอนเท่ากับร้อยละ 96.6-97

Piyanuch และ Sasiwimol [30] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 12.8 โดยใช้กระบวนการผลิตแบบสองขั้นตอน เนื่องจากน้ำมันมะพร้าวมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง ดังนั้นในขั้นตอนแรกจึงต้องทำการลดปริมาณกรดไขมันอิสระโดยใช้กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้เหลือร้อยละ 0.6 ภาวะที่เหมาะสมคืออัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเท่ากับ 0.35 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.7 โดยปริมาตรของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ในขั้นตอนที่สองนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเมทานอลซึ่งใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่สองคืออัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเท่ากับ 0.4 โดยปริมาตร

ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมัน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลเท่ากับร้อยละ 98.4 โดยน้ำหนัก

Hayyan และคณะ [1] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกากตะกอนน้ำมันปาล์ม (Sludge palm oil) ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นสูงเท่ากับร้อยละ 22.33 ด้วยกระบวนการสองขั้นตอน โดยในขั้นแรกใช้กรดโทลูอีน-4-ซัลโฟนิกโมโนไฮเดรต (PTSA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน เพื่อต้องการลดปริมาณกรดไขมันอิสระลงให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ต่อด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนแรกต้องใช้ปริมาณกรดโทลูอีน-4-ซัลโฟนิกโมโนไฮเดรตร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล (โมล:โมล) คือ 1 : 10 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วของการกวน 400 รอบต่อนาที ในขั้นตอนที่สองใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทน PTSA และใช้ภาวะปฏิกิริยาเช่นเดียวกับขั้นตอนแรก คือ อัตราส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1 : 10 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วของการกวน 400 รอบต่อนาที หลังจากขั้นตอนการแยกและทำให้บริสุทธิ์แล้ว ได้ผลได้ไบโอดีเซลเท่ากับร้อยละ 76.62 มีกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ร้อยละ 0.07 และมีปริมาณเอสเทอร์เท่ากับร้อยละ 96 มีคุณภาพได้ตามมาตรฐาน EN14214 และ ASTM D6751

Gan และคณะ [31] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วหลังจากการปรุงอาหาร (waste cooking oil) ผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เฟอริกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าโปรตอน (H^+) ที่เกิดจากไฮโดรไลซิสของไอออนเชิงซ้อน $[Fe(H_2O)^6]^{3+}$ [hexa-aquoiron (III) ion] ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน ที่ปริมาณเฟอริก-ซัลเฟตร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนระหว่างน้ำมันใช้แล้วหลังจากการปรุงอาหารต่อเมทานอล (โมล:โมล) เท่ากับ 1 : 15 ได้ค่าการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระสูงสุดประมาณร้อยละ 59.15

Gomes และคณะ [32] ศึกษาการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เมมเบรนเซรามิกแบบท่อที่ทำจาก Al_2O_3/TiO_2 เนื่องจากการมีกลีเซอรอลในปริมาณมากทำให้เกิดปัญหาในด้านการจัดเก็บและระบบฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ พบว่าเมมเบรนเซรามิกที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร ใช้แรงขับดันเท่ากับ 2 บาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีสมรรถนะดีที่สุด โดยให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตเท่ากับ 78.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ปริมาณของกลี-

เซอรอลในเพอร์มิเอต (ส่วนที่แพร่ผ่านเมมเบรน) เท่ากับร้อยละ 0.06 ± 0.01 โดยน้ำหนัก และค่าการกักกันกลีเซอรอลร้อยละ 99.4 เมื่อพิจารณาในส่วนความเข้มข้นของเอทานอลในของผสม พบว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 5 ได้ ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตเท่ากับ 63.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ปริมาณของกลีเซอรอลในเพอร์มิเอตเท่ากับร้อยละ 0.04 ± 0.00 โดยน้ำหนัก และค่าการกักกันกลีเซอรอลร้อยละ 99.6 เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 5) ส่งผลให้ขนาดของหยดกลีเซอรอลที่กระจายอยู่ในไบโอดีเซลเล็กลงทำให้มีปริมาณของกลีเซอรอลในเพอร์มิเอตเพิ่มขึ้น แต่ค่าการกักกันกลีเซอรอลลดลง

Sarkar และคณะ [5] ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลจากกรดโอเลอิกกับเมทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในชุดการทดสอบเมมเบรนเพอแวปพอเรชัน (pervaporation) ซึ่งใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นแรงผลักดัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์น้ำที่ได้จากกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ งานวิจัยนี้เลือกใช้เมมเบรนชอบน้ำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์คอมพอสิตบนซับสเตรตพอลิอีเทอร์ซัลโฟน พบว่าภาวะที่ให้ค่าการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลสูงสุดคือ ใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างกรดโอเลอิกต่อเมทานอล (โมล: โมล) เท่ากับ 1 : 27 ใช้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ค่าการเปลี่ยนประมาณร้อยละ 99.9 ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มีกระบวนการเพอแวปพอเรชันพบว่าการที่มีกระบวนการเพอแวปพอเรชันทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระมากกว่าแบบไม่มีกระบวนการเพอแวปพอเรชัน

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีหลัก

1. เมมเบรนไคโตซาน (Commercial grade) ได้แก่ เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์และมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด
2. ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม (PFAD) จากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน)
3. เมทานอล (MeOH) ความเข้มข้นร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
4. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
6. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N_2): ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน (Chitosan membrane reactor)
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat)
3. เครื่องกวนสาร (Overhead Stirrer)
4. เครื่องควบแน่น (Reflux condenser)
5. เครื่องให้ความร้อนและกวน (Hotplate & Stirrer)
6. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator)
7. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
8. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

1. เครื่องทดสอบ Universal Testing: LLOYD Instruments LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

2. เครื่อง Scanning Electron Microscopy: JEOL รุ่น JSM-6480 LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3. เครื่อง Gas Chromatography: Shimadzu GC-14B (ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

4. เครื่องทดสอบ Contact angle: Rame-hart 200F1 (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 การทดสอบลักษณะสมบัติของเมมเบรน

3.4.1 ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบมีการเชื่อมขวางตามมาตรฐาน ASTM D882 (Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบกับแผ่นพลาสติกที่มีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร หรือฟิล์มพลาสติกบางมีความหนาไม่มากกว่า 0.25 มิลลิเมตร ดังนี้

1. ตัดเมมเบรนขนาด 5×150 ตารางมิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.1 (ก)

2. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์

3. ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ดังภาพที่ 3.1 (ข) โดยมีภาวะที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

ก) ความเร็วในการดึง (Crosshead speed) เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

ข) ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร

ค) ใช้ค่าโหลดเซลล์ (Load cell) เท่ากับ 100 นิวตัน

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [33] พบว่าเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตควรทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบกับแผ่นพลาสติกทั้งที่ไม่มีการเสริมแรง (Unreinforced plastics) หรือมีการเสริมแรง (Reinforced plastics) ที่มีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร จนถึง 14 มิลลิเมตร ดังนี้

1. ตัดเมมเบรนให้มีขนาดดังภาพที่ 3.2
2. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
3. ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยมีภาวะที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

ก) ความเร็วในการดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

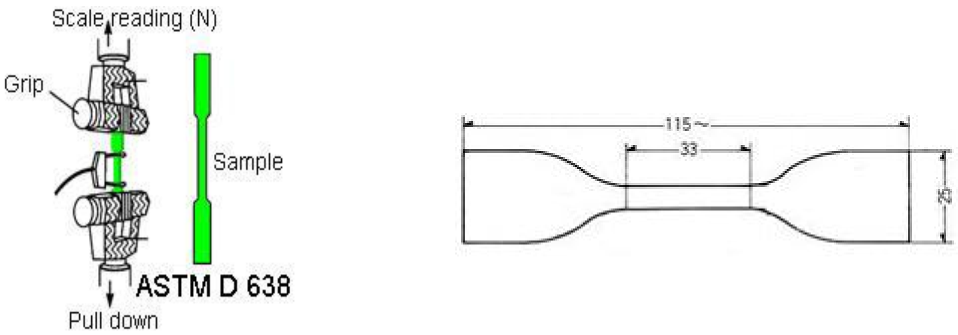
ข) ระยะของการจับชิ้นงานเท่ากับ 50 มิลลิเมตร

ค) ใช้ค่าโหลดเซลล์เท่ากับ 100 นิวตัน

(ก) ลักษณะแผ่นเมมเบรน

(ข) เครื่อง Universal testing machine

ภาพที่ 3.1 เครื่อง Universal Testing: LLOYD Instruments LR 5K



ภาพที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต

3.4.2 **การศึกษาสัณฐานวิทยา** (Morphology)

ศึกษาภาคตัดขวางของเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope, SEM ณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3 **ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน** (Water uptake)

1. ตัดเมมเบรนขนาด 1×1 ตารางนิ้ว
2. ชั่งน้ำหนักของเมมเบรนแห้ง
3. แช่เมมเบรนในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนสมดุล
4. เช็ดน้ำบนผิวหน้าของเมมเบรนออกด้วยกระดาษซับอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้น้ำที่ดูดซับในเมมเบรนระเหยออกไป และนำไปชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน ตามสมการที่ (3.1)

$$\text{ปริมาณการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักเมมเบรนเปียก - น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}}{\text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}} \qquad (3.1)$$

3.4.4 **ความชอบน้ำของเมมเบรน** (Hydrophilicity)

ศึกษาสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนจากค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเมมเบรนกับเส้นสัมผัสหยดน้ำ โดยเป็นการวัดแบบอยู่กับที่ (Static) ณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.5 **ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์** (Pure water permeability)

1. ตัดเมมเบรนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร วางบนหน้าแปลนของชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบดังภาพที่ 3.3
2. ป้อนน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที (อัตราการไหลสูงสุดของปั๊มความดันสูงในงานวิจัยนี้) เข้าไปใน Membrane cell
3. ควบคุมแรงดันทางด้านสารป้อนที่ระดับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ขณะที่ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับความดันบรรยากาศ

4. รอจนได้ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนคงที่ (Steady state)

5. จับเวลาวัดปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรน คำนวณค่าฟลักซ์ตามสมการที่ (3.2)

6. เปลี่ยนเมมเบรนแผ่นใหม่และควบคุมค่าแรงดันด้านสารป้อนเป็น 200 และ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ จับเวลาวัดปริมาณน้ำเพอร์มิเอตที่แต่ละแรงดันเพื่อคำนวณค่าฟลักซ์ตามสมการที่ (3.2)

$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \qquad (3.2)$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร/ชั่วโมง)

Q = ปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (ลิตร)

A = พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ตารางเมตร)

Δt = เวลาที่เก็บเพอร์มิเอต (ชั่วโมง)

ภาพที่ 3.3 ชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบ

3.4.6 ความสามารถในการกักดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล

1. ตัดเมมเบรนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร วางบนหน้าแปลนของชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบ

2. ป้อนดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าไปใน Membrane cell

3. ควบคุมแรงดันทางด้านสารป้อนที่ระดับ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ขณะที่ความดันด้านเพอร์มิเอตเท่ากับความดันบรรยากาศ

4. รอจนได้ปริมาณที่ซึมผ่านเมมเบรนคงที่ (Steady state)

5. หาความเข้มข้นของปริมาณกรดไขมันอิสระด้านสารป้อนและด้านเพอร์มิเอต

6. คำนวณค่าร้อยละการกักกันสาร (%R) ตามสมการที่ (3.3)

7. เปลี่ยนสารป้อนเป็นไบโอดีเซลแล้วดำเนินตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 ข้างต้น ด้วยแผ่นเมมเบรนใหม่

8. หาความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ในสารป้อนและเพอร์มิเอตเพื่อคำนวณค่าร้อยละการกักกันตามสมการที่ (3.3)

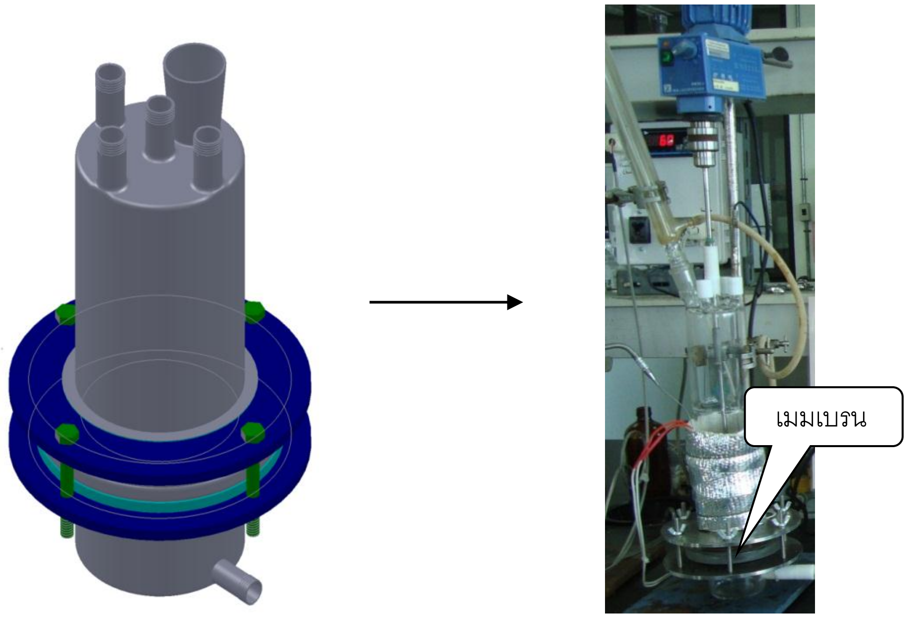
$$\%R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \qquad (3.3)$$

เมื่อ C_p = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอร์มิเอต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

C_f = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารป้อน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

3.5 การออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบ Stirred cell reactor

เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เชื่อมติดต่อกันด้วยเซลล์เมมเบรน (Membrane cell) มีลักษณะคล้ายหน้าแปลนของชุดทดสอบสมบัติเมมเบรนแบบแผ่นและกรอบดังภาพที่ 3.4 กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันดำเนินอยู่ในส่วนด้านบนเหนือเซลล์เมมเบรนขนาดความจุ 2 ลิตร ที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เครื่องกวนสาร และเครื่องควบแน่นประกอบอยู่ด้วย ผลิตภัณฑ์น้ำจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ PFAD กับเมทานอลซึม



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน (ก) แบบจำลอง (ข) ใช้งานจริง

ผ่านเมมเบรนไคโตซานไปสะสมอยู่ในส่วนด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ใต้เซลล์เมมเบรน เรียกเครื่องปฏิกรณ์นี้ว่าเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

3.6 การผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม

เมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ชนิด คือ เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และเมมเบรนไคโตซานคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์แบบมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งทั้งหมดได้รับความอนุเคราะห์ผลิตโดยบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ทำให้ได้แผ่นเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่และสม่ำเสมอใช้ตลอดการศึกษา

ตัวแปรที่ศึกษาการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในงานวิจัยนี้ซึ่งต่อเนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ได้แก่

(ก) อัตราส่วนระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล (โมล:โมล) = 1:8 และ 1:9

(ข) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (ชั่วโมง) = 1 - 10

(ค) ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก) = 1, 2 และ 3

(ง) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส) = 50 และ 60

ประกอบแผ่นเมมเบรนไคโตซานเข้าที่ส่วนของเซลล์เมมเบรน ผนึกส่วนด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนเข้าด้วยกันให้แน่น หลอมดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มปริมาณ 101.46 กรัม ที่อุณหภูมิ 40 – 50 องศาเซลเซียส และเทเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน เมทานอลและกรดซัลฟิวริกตามปริมาณที่กำหนดในการศึกษาถูกกวนผสมกันเป็นเวลา 15 นาที ก่อนที่จะเติมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน ดำเนินปฏิกิริยาตามภาวะที่กำหนดในการศึกษา ถ่ายผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาใส่ในกรวยแยกเพื่อให้เกิดการแยกเฟสซึ่งส่วนล่างคือไบโอดีเซล ทำการล้างด้วยน้ำอุ่นจนกระทั่งได้สารละลายใส ตั้งทิ้งให้ไบโอดีเซลเกิดการแยกชั้นกับน้ำ ได้ไบโอดีเซลอยู่ส่วนบน สำหรับน้ำและเมทานอลที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลถูกกำจัดออกโดยการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และโดยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนตามลำดับ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ (% FAME yield) และร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ (% FFA conversion)

เนื่องจากมีสมมติฐานว่าการเพิ่มแรงผลักดัน (Driving force) ข้ามเมมเบรนน่าจะสามารถดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาได้มากขึ้น จึงนำภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองข้างต้นมาศึกษาต่อ โดยต่อส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนเข้ากับปั๊มสุญญากาศและกักเก็บน้ำด้วยไนโตรเจนเหลวดังภาพที่ 3.5 มีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

(ก) ระดับสุญญากาศท้ายเมมเบรน (บาร์) = –0.5, –0.75 และ –1

(ข) Time lag ของการสร้างสุญญากาศหลังการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (ชั่วโมง) = 0.5 – 1.5

เพื่อต้องการให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็นไปตามมาตรฐานของประเทศไทย จึงนำไบโอดีเซลจากภาวะที่เหมาะสมที่สุดมาดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันต่อเป็นขั้นตอนที่ 2 โดยการทำปฏิกิริยากับเมทานอลโดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาพที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ

3.7 การวิเคราะห์ไบโอดีเซล

3.7.1 การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ

สามารถหาปริมาณกรดไขมันอิสระได้โดยวิธีไทเทรต [34] ดังนี้ ขั้นแรกทำการเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในไอโซโพรพานอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นค่อย ๆ หยดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีชมพู และเมื่อเติมน้ำมันลงไปในปริมาณ 2 กรัม สารละลายที่ได้มีสีเหลืองอ่อนใส หลังจากนั้นค่อย ๆ หยดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนใสเป็นสีชมพู และนำปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่ได้มาคำนวณหาร้อยละของกรดไขมันอิสระและร้อยละการเปลี่ยนตามสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ

$$\text{ร้อยละของกรดไขมันอิสระ} = \frac{\text{ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์} \times \text{ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์} \times 25.6}{\text{น้ำหนักของน้ำมัน}} \quad (3.4)$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยน} = \frac{\text{กรดไขมันอิสระเริ่มต้น - กรดไขมันอิสระที่เหลือ}}{\text{กรดไขมันอิสระเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (3.5)$$

3.7.2 การหาร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

ทำการหาเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในไบโอดีเซล โดยใช้วิธีโครมาโท-กราฟีแบบแก๊ส (Gas chromatography) ตามมาตรฐาน EN 14103 และนำมาคำนวณหาร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ตามสมการที่ (3.6)

$$\text{ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักเอสเทอร์}}{\text{น้ำหนักกรดไขมันอิสระเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (3.6)$$

3.7.3 การทดสอบสมบัติของไบโอดีเซล

วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลตามมาตรฐานของประเทศไทยและมาตรฐาน ASTM D6751-02 ดังนี้

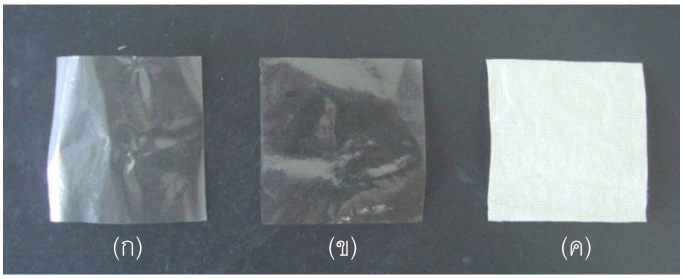
1. ค่าไอโอดีน (Iodine value) ตามมาตรฐาน ASTM D5554
2. ค่าความเป็นกรด (Acid value) ตามมาตรฐาน ASTM D664
3. จุดวาบไฟ (Flash point) ตามมาตรฐาน ASTM D93
4. ความหนืด (Kinematic viscosity) ตามมาตรฐาน ASTM D445
5. จุดขุ่น (Cloud point) ตามมาตรฐาน ASTM D2500
6. จุดเริ่มไหล (Pour point) ตามมาตรฐาน ASTM D97

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติของเมมเบรน

เมมเบรนไคโตซาน 3 แบบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ แบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง แบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์และมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก มีลักษณะภายนอกดังภาพที่ 4.1 โดยเนื้อไคโตซานมีสีเหลืองทอง แผ่นเมมเบรนแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางจึงมีลักษณะเป็นแผ่นสีเหลืองโปร่งใสของ เนื้อไคโตซานเท่านั้น แต่การเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกทำให้แผ่นเมมเบรนแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางมีลักษณะเป็นแผ่นสีเหลืองโปร่งใสกว่า และสำหรับแบบคอมพอสิตมีลักษณะเป็นผืนผ้าที่มีเนื้อไคโตซานสีเหลืองเคลือบและ/หรือแทรกซึมอยู่ตลอดภาคตัดขวางของผืนผ้า



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของเมมเบรนไคโตซาน

(ก) แบบสมมาตรไม่เชื่อมขวาง (ข) แบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง (ค) แบบคอมพอสิตเชื่อมขวาง

4.1.1 ผลการทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรนตามมาตรฐาน ASTM D882 (Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting) ของเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง แบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และแบบคอมพอสิตบนผ้าสปันปอนด์และมีการเชื่อมขวางด้วยกรดมีค่าเท่ากับ 72.0 ± 3.6 เมกะพาสคัล, 82.1 ± 1.5 เมกะพาสคัล และ 19.9 ± 1.2 เมกะพาสคัลตามลำดับ ซึ่งเป็นไป

ไม่ได้สำหรับแบบคอมพอสิตเพราะต่ำเกินไป ขณะที่ค่าที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM D638 (Standard test method for tensile properties of plastics) มีค่าเท่ากับ 47.9 ± 0.4 เมกะพาสคัล, 50.6 ± 3.4 เมกะพาสคัล และ 53.6 ± 0.7 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มีความสมเหตุผลมากกว่าและสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [33] เนื่องจากเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตมีชั้นของผ้าสปันปอนด์เป็นตัวรองรับ จึงส่งผลให้เมมเบรนมีความแข็งแรงมากกว่าและยืดได้มากกว่าเมมเบรนแบบสมมาตรที่ไม่มีชั้นรองรับ และการเชื่อมขวางทำให้เกิดพันธะไอออนิกเสริมความแข็งแรงให้กับเมมเบรนไคโตซานแต่ยืดได้น้อยลง

อย่างไรก็ตาม ตามขอบเขตของมาตรฐาน ASTM D882 และ D638 ดังกล่าวแล้วในบทที่ 3 จึงสรุปว่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง และที่มีการเชื่อมขวางเท่ากับ 72.0 ± 3.6 และ 82.1 ± 1.5 เมกะพาสคัล ตามมาตรฐาน ASTM D882 และความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบคอมพอสิตเท่ากับ 53.6 ± 0.7 เมกะพาสคัล ตามมาตรฐาน ASTM D638

ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรน

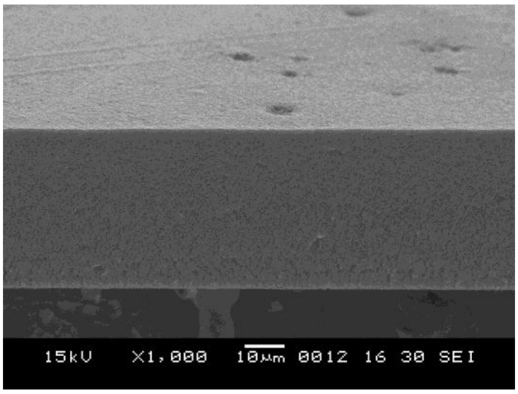
เมมเบรน	ความหนา (mm)	ASTM D882		ASTM D638	
		ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืด	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืด
ไม่เชื่อมขวาง	0.04 ± 0.02	72.0 ± 3.6	8.6 ± 1.5	47.9 ± 0.4	7.0 ± 4.3
เชื่อมขวาง	0.04 ± 0.01	82.1 ± 1.5	7.9 ± 1.5	50.6 ± 3.4	3.2 ± 0.0
คอมพอสิต	0.13 ± 0.04	19.9 ± 1.2	18.2 ± 1.0	53.6 ± 0.7	14.7 ± 3.2

4.1.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

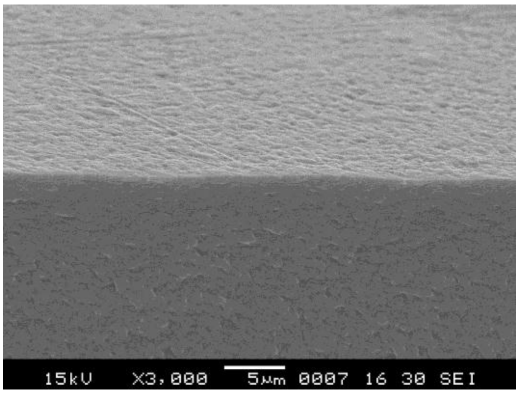
จากการศึกษาภาคตัดขวางของเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด แสดงในภาพที่ 4.2 (ก)-(จ) พบว่าเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางและมีการเชื่อมขวางมีลักษณะเนื้อแน่นไม่มีรูพรุน โดยแบบที่มีการเชื่อมขวางมีโครงสร้างเนื้อแน่นกว่า จึงทำให้ได้ค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรนแบบมีการเชื่อมขวางมีค่าสูงกว่าแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และในส่วนของเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตดังภาพที่ 4.2 (จ) จะสังเกตเห็นเนื้อไคโตซานเคลือบอยู่บนเส้นใยและแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยของผ้าสปันปอนด์เป็นเนื้อเดียวกัน

4.1.3 ผลของปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

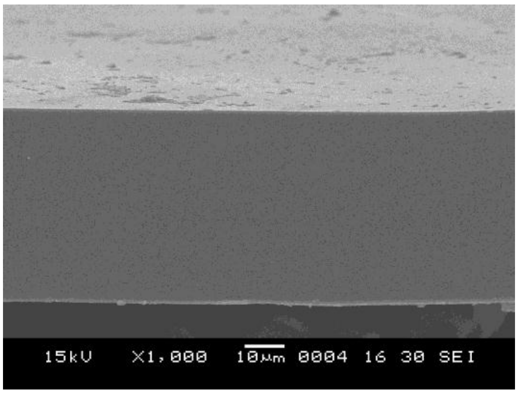
จากตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณการดูดซับน้ำของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 3 แบบ มีค่าเท่ากับ 0.8 ± 0.0, 0.7 ± 0.0 และ 0.5 ± 0.0 กรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมมเบรนที่มีความสามารถดูดซับน้ำได้มาก มีความสำคัญต่อการดึงน้ำออกจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ PFAD กับเมทานอลให้ดำเนินไปข้างหน้าได้เมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากที่สุดโดยไม่ผันกลับ จากผลการศึกษาสามารถสังเกตเห็นได้ว่าเมมเบรนแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางมีปริมาณการดูดซับน้ำได้มากที่สุดเนื่องจากหมู่เอมีนในโครงสร้าง ส่วนพันธะของซัลเฟตในเมมเบรนแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางน่าจะทำให้เมมเบรนมีความชอบน้ำมากขึ้น แต่จากผลการศึกษาได้ค่าการดูดซับน้ำน้อยลง เนื่องจากการเชื่อมขวางมีผลทำให้เมมเบรนแน่นขึ้น และสายโซ่โมเลกุลเกิดการเรียงตัวและยึดเหนี่ยวกันได้ดี [24] สอดคล้องกับผลการตรวจสอบด้วย SEM สำหรับเมมเบรนแบบคอมพอสิตมีความสามารถดูดซับน้ำน้อยที่สุด แต่จากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผ้าสปันปอนด์ [35] และมีเนื้อไคโตซานเคลือบอยู่บนผิวหน้าเพียงบาง ๆ ทำให้โมเลกุลน้ำไม่ถูกดูดซับไว้ในเมมเบรนโดยเนื้อไคโตซานแต่ซึมผ่านออกไป



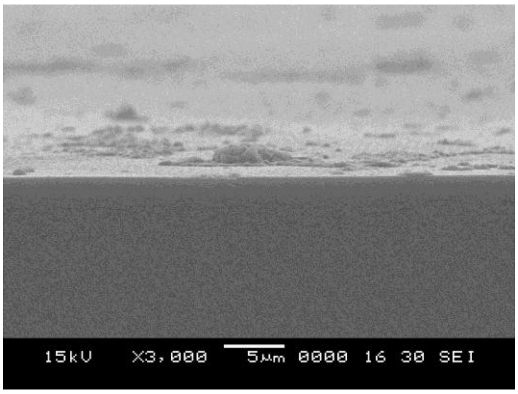
(ก)



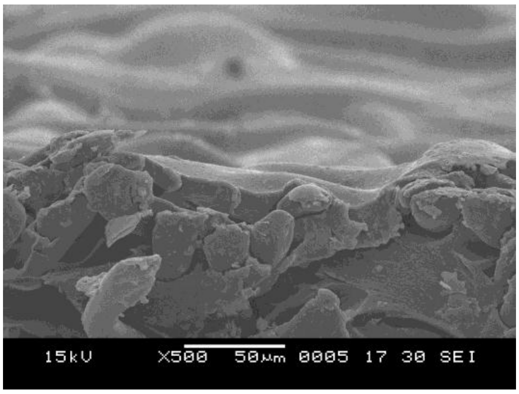
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.2 ภาคตัดขวาง SEM ของเมมเบรนไคโตซาน

(ก) เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ข) เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

(ค) เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ง) เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

(จ) เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.1.4 ผลการทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรนจากค่ามุมสัมผัส

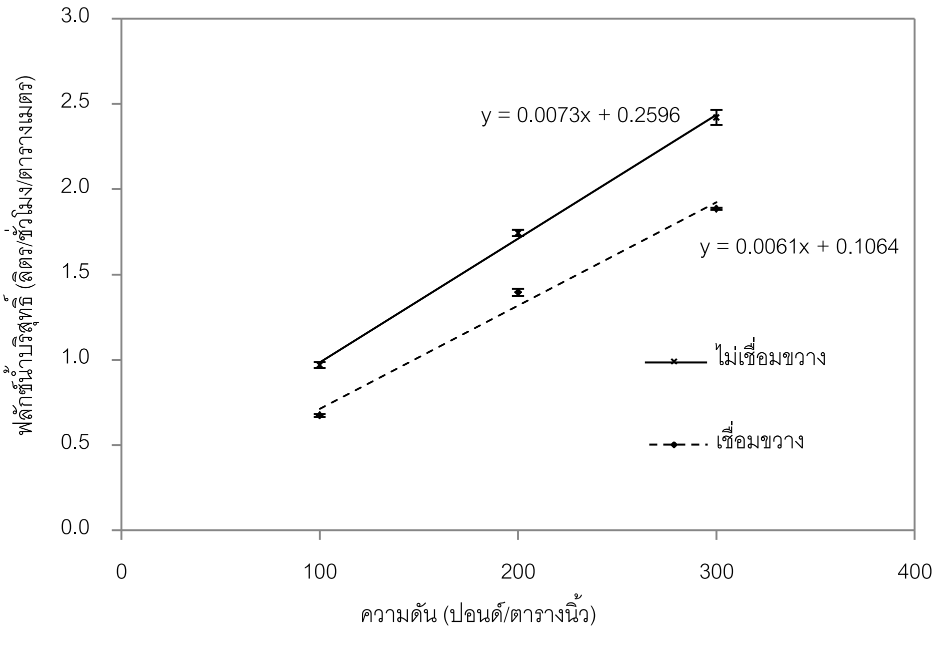
โดยทั่วไปการทดสอบความชอบน้ำของเมมเบรนสามารถวัดได้จากค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ระหว่างเส้นสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวของเมมเบรน โดยมีวิธีการวัดอยู่ 2 แบบ คือ แบบอยู่กับที่ (Static) เป็นการวัดมุมสัมผัสหลังจากหยดน้ำตกลงบนเมมเบรนทันที และแบบเคลื่อนที่ (Dynamic) เป็นการทำให้หยดน้ำเกิดการเคลื่อนที่ก่อน แล้วจึงทำการวัดค่ามุมสัมผัส แต่จากการทดสอบแบบเคลื่อนที่พบว่าหลังจากหยดน้ำตกลงบนเมมเบรนแล้ว เมมเบรนเกิดการบวมตัวอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถทำการวัดค่ามุมสัมผัสแบบเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการวัดแบบอยู่กับที่ จากตารางที่ 4.2 แสดงค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 3 แบบ มีค่าเท่ากับ 96.8 ± 1.3, 105.6 ± 2.1 และ 87.7 ± 3.7 ตามลำดับ พบว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิตมีค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุด แสดงว่าเมมเบรนแบบคอมพอสิตมีความสามารถเปียกน้ำได้มากที่สุดเกิดชั้นน้ำ (Water layer) ปกคลุมผิวหน้าได้มากที่สุดทำให้ได้การแพร่ซึมน้ำผ่านเมมเบรน (Water permeability) มากที่สุดโดยไม่ได้ถูกดูดซับไว้ด้วยอิทธิพลหมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน ขณะที่เมมเบรนแบบสมมาตรที่สามารถดูดซับน้ำได้มากจะแสดงค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่า แสดงถึงการมีสมบัติความชอบน้ำมากกว่า จึงกล่าวได้ว่าเมมเบรนไคโตซานแบบไม่มีการเชื่อมขวางมีความชอบน้ำมากกว่าแบบมีการเชื่อมขวาง

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณการดูดซับน้ำและมุมสัมผัสของเมมเบรน

เมมเบรน	ปริมาณดูดซับน้ำ (กรัม/กรัม)	มุมสัมผัส
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง	0.8 ± 0.0	96.8 ± 1.3
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง	0.7 ± 0.0	105.6 ± 2.1
เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต	0.5 ± 0.0	87.7 ± 3.7

4.1.5 ผลการทดสอบความสามารถการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์

ความสามารถการแพร่ผ่านน้ำ (Water permeability) ของเมมเบรนได้จากค่าความชันของกราฟพล็อตระหว่างค่าฟลักซ์น้ำกับความดันดังแสดงในภาพที่ 4.3 สำหรับเมมเบรนแบบสมมาตรซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0073 และ 0.0061 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่อปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางและแบบเชื่อมขวางตามลำดับ โดยเมมเบรนที่ให้ค่าความสามารถการแพร่ผ่านน้ำมากกว่าแสดงความชอบน้ำที่มากกว่า แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานแบบไม่มีการเชื่อมขวางมีความชอบน้ำมากกว่าแบบมีการเชื่อมขวาง สอดคล้องกับผลการศึกษาความสามารถการดูดซับน้ำและค่ามุมสัมผัส แต่เมมเบรนแบบคอมพอสิตไม่ต้องใช้แรงขับดันโมเลกุลน้ำก็สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้อย่างง่ายดาย



ภาพที่ 4.3 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรที่ไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวาง

4.1.6 ผลการทดสอบความสามารถในการกักดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล

เมมเบรนที่จะนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนควรมีสมบัติการแพร่ผ่านน้ำสูงอย่างเดียว แต่ต้องกันไม่ให้สารเริ่มต้นปฏิกิริยา PFAD และผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลผ่านเมมเบรนไปได้ จึงต้องมีการทดสอบสมบัติความสามารถในการกัก PFAD และไบโอดีเซล พบว่าทั้งเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรที่ไม่มีการเชื่อมขวางและมีการเชื่อมขวางสามารถกักไม่ให้ PFAD และไบโอดีเซลผ่านเมมเบรนไปแม้จะใช้แรงขับดันสูงถึง 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กล่าวคือเมมเบรนทั้งสองชนิดมีค่าร้อยละการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซลเท่ากับ 100.0 ± 0.0 และ 100.0 ± 0.0 ตามลำดับ แสดงว่าทั้งดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซลไม่สามารถซึมผ่านเมมเบรนมายังด้านเพอร์มิเอตได้เลย แต่สำหรับเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต มีค่าร้อยละการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซลที่แรงขับดันเท่ากับ 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เท่ากับ 0.0 ± 0.0 และ 1.4 ± 0.8 ตามลำดับ แสดงว่าเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตยอมให้ทั้งดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซลแพร่ผ่านเมมเบรนไปได้มาก

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าร้อยละการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล

ชนิดของเมมเบรน	ร้อยละการกักกัน (%R)	
	ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม	ไบโอดีเซล
เมมเบรนแบบสมมาตร ไม่มีการเชื่อมขวาง	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0
เมมเบรนแบบสมมาตร มีการเชื่อมขวาง	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0
เมมเบรนแบบ คอมพอสิต	0.0 ± 0.0	1.4 ± 0.8

4.2 ผลการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

ในหัวข้อนี้ทำการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้ง 3 ชนิด เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ มีดังนี้

4.2.1 ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล

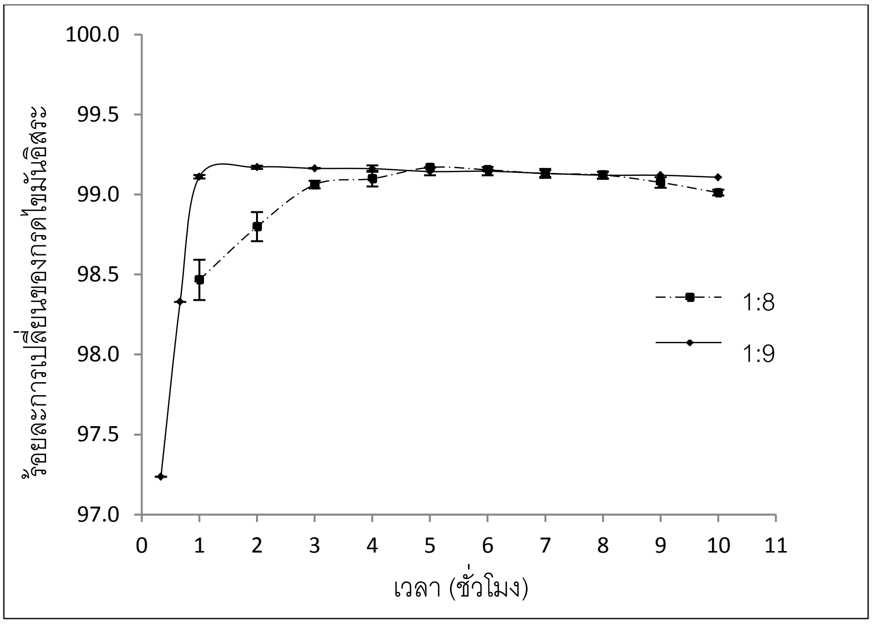
จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล (โมล:โมล) ที่ 1:8 และ 1:9 ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้ง 3 ชนิด ดังภาพที่ 4.4-4.6 พบว่า

เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ (%FFA Conversion) สูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง เท่ากับ 98.8 ± 0.1 และ 99.2 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.1 ± 0.1 และ 0.7 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

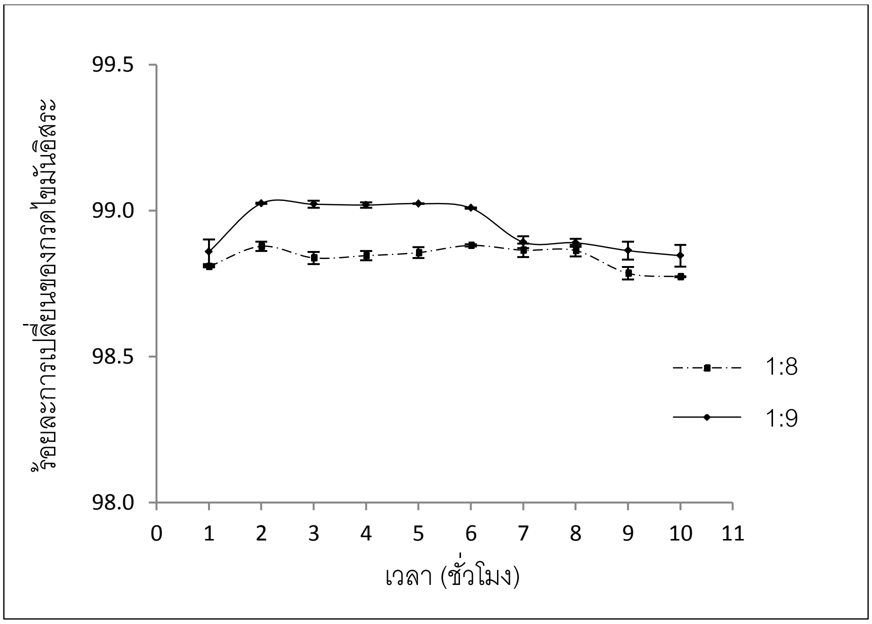
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระที่เวลา 2 ชั่วโมง เท่ากับ 98.8 ± 0.0 และ 99.0 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.0 ± 0.0 และ 0.9 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระที่เวลา 2 ชั่วโมง เท่ากับ 98.9 ± 0.0 และ 99.1 ± 0.1 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 0.9 ± 0.0 และ 0.8 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

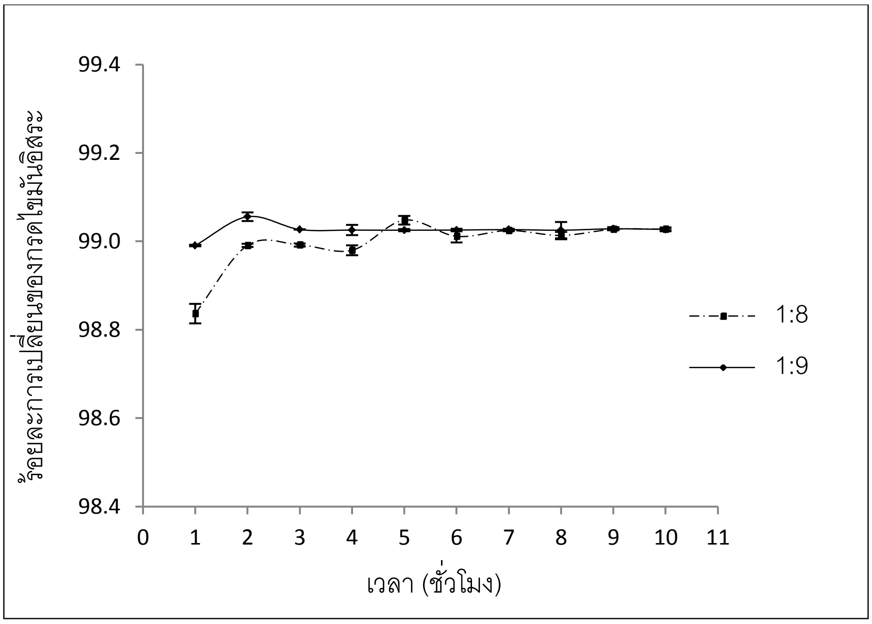
ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง PFAD : เมทานอล ที่ 1:9 โมลต่อโมลเป็นภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล และเมื่อเปรียบเทียบเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่าเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางให้ผลที่ดีที่สุด



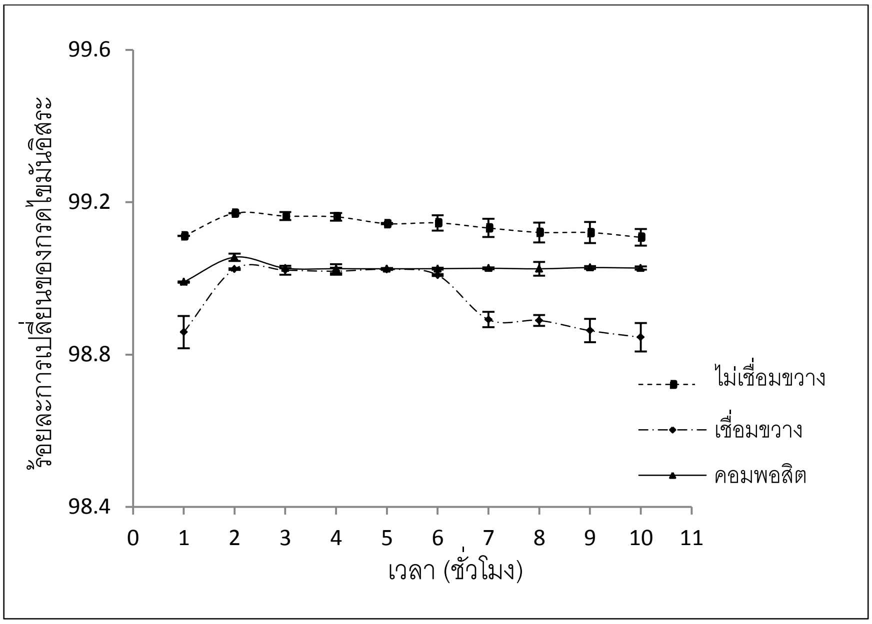
ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง (ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง (ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4.6 ผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต (ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด (อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

4.2.2 ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริก

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงต้องดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนเป็นขั้นตอนแรก ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ราคาถูก [5] จากภาพที่ 4.8 แสดงผลของการศึกษาปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิดที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า

เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 98.3 ± 0.0, 98.7 ± 0.0 และ 99.2 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.5 ± 0.0, 1.2 ± 0.0 และ 0.7 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 97.8 ± 0.0, 98.6 ± 0.0 และ 99.0 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 2.0 ± 0.0, 1.2 ± 0.0 และ 0.9 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 98.3 ± 0.0, 98.7 ± 0.0 และ 99.1 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.5 ± 0.0, 1.2 ± 0.0 และ 0.8 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางให้ผลที่ดีที่สุด

4.2.3 ผลของอุณหภูมิ

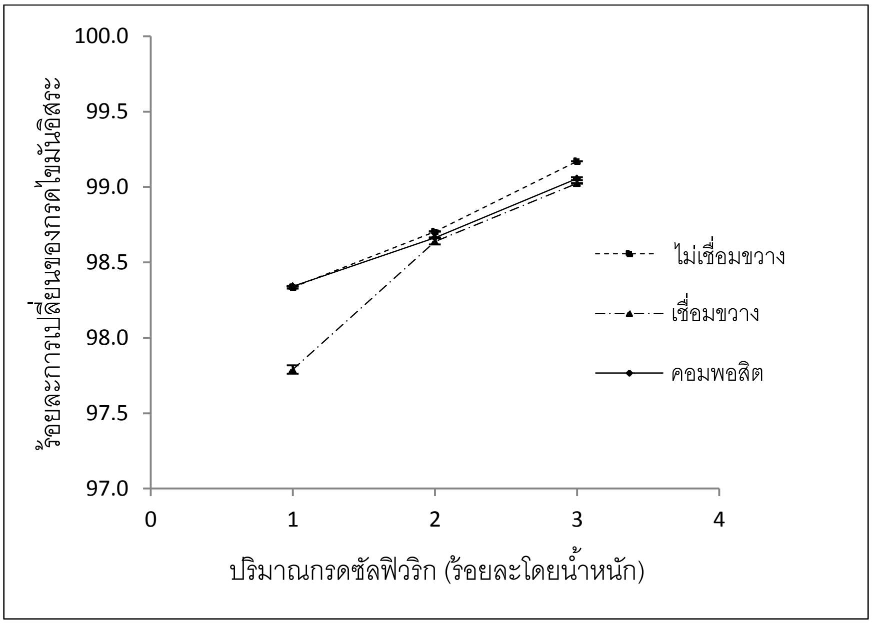
โดยทั่วไปการใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกินจุดเดือดของเมทานอล (64.7 องศาเซลเซียส) งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิดดังภาพที่ 4.9 ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า

เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 98.6 ± 0.0 และ 99.2 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.3 ± 0.0 และ 0.7 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

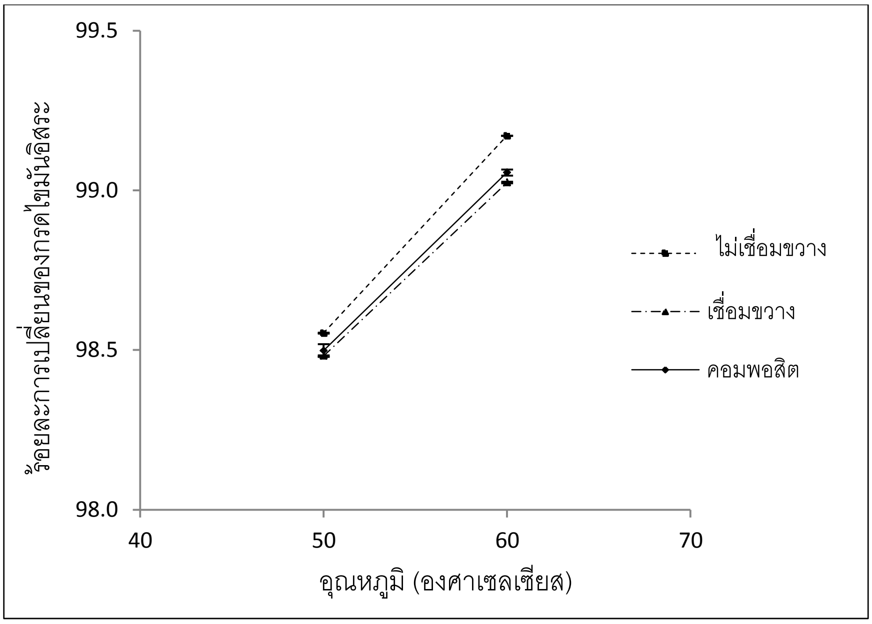
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวางได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 98.5 ± 0.0 และ 99.2 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.3 ± 0.0 และ 0.7 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิตได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเท่ากับ 98.5 ± 0.0 และ 99.2 ± 0.0 มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 1.3 ± 0.0 และ 0.7 ± 0.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางให้ผลที่ดีที่สุด



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด (อัตราส่วน PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล เวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานทั้งสามชนิด (อัตราส่วน PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เวลา 2 ชั่วโมง)

กล่าวโดยสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันคือ อัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอลเท่ากับ 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง

เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนชัดเจนขึ้น จึงดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวข้างต้นในเครื่องปฏิกรณ์แก้วทั่วไป สรุปได้ผลตามตารางที่ 4.4 ว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระและร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME yield) สูงกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ เนื่องจากตามปกติผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน คือ เมทิลเอสเทอร์และน้ำ หากมีปริมาณน้ำเกิดขึ้นมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ลดลง (ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.1) เพราะฉะนั้นการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีสมบัติชอบน้ำ [22] จึงสามารถแยกผลิตภัณฑ์น้ำออกจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันได้ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระและร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป และเมม

เบรนชนิดที่มีความชอบน้ำมากกว่า (ปริมาณการดูดซับน้ำมาก มุมสัมผัสน้อย) คือ เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางจะให้ผลที่ดีกว่า ถึงแม้เมมเบรนแบบคอมพอสิตจะให้ค่าการแพร่ผ่านน้ำสูง มีค่ามุมสัมผัสต่ำ แต่ทั้งวัตถุดิบ PFAD และผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลก็สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้สูงกว่าเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง จึงทำให้ได้ผลที่แย่กว่า

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด

ชนิด	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์
เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0	96.7 ± 1.1
เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0	93.8 ± 1.1
เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0	95.0 ± 0.1
เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป	98.6 ± 0.0	1.3 ± 0.0	92.0 ± 2.6

4.3 ผลของการต่อท้ายเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนด้วยระบบสุญญากาศ

เพื่อต้องการแยกผลิตภัณฑ์น้ำออกจากปฏิกิริยาได้มากขึ้น จึงนำภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 4.2 ซึ่งก็คือ อัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มาดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่เชื่อมขวางซึ่งต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศเพื่อเพิ่มแรงขับดัน (Driving force)

ของโมเลกุลน้ำคร่อมเมมเบรน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ มีดังนี้

4.3.1 **ผลของ** Time lag

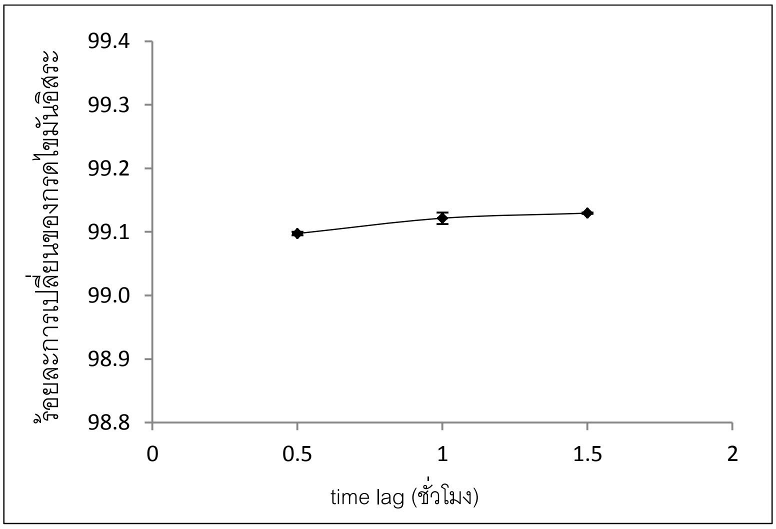
ก่อนเปิดปั๊มสุญญากาศต้องให้มีเวลาเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันตามปกติก่อน ซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกว่า Time lag กำหนดเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง โดยใช้ระดับสุญญากาศสูงสุดคือ -1.0 บาร์ ได้ผลดังภาพที่ 4.10 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระใกล้เคียงกัน เท่ากับ 99.1 (99.10 ± 0.00, 99.12 ± 0.01 และ 99.13 ± 0.00 ตามลำดับ) ซึ่งน้อยกว่าการดำเนินปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนปกติเล็กน้อย (99.2 ± 0.0) ไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ว่าจะได้ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระมากขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นเกิดการระเหยและซึมผ่านเมมเบรนออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์น้ำด้วย ส่งผลทำให้สัดส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลลดลง

4.3.2 **ผลของระดับสุญญากาศท้ายเมมเบรน**

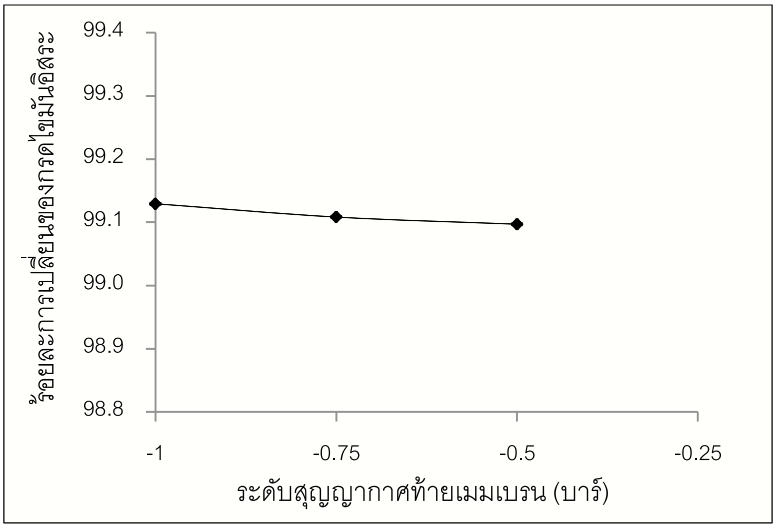
ทำการลดระดับสุญญากาศจาก -1.0 เป็น -0.5 บาร์ และใช้ Time lag 1.5 ชั่วโมง พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระลดลงเล็กน้อยจาก 99.13 ± 0.00 เป็น 99.10 ± 0.00 ดังภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการสร้างแรงขับดันให้กับโมเลกุลน้ำด้วยการสร้างสุญญากาศที่ส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนสามารถทำให้โมเลกุลน้ำแยกออกจากผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาได้จริงแต่เกิดข้อเสียที่ทำให้เมทานอลเกิดการระเหยและซึมผ่านเมมเบรนออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์น้ำด้วย

จากตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแบบไม่ต่อท้ายด้วยระบบสุญญากาศ (ตอนที่ 1) ที่ภาวะอัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และมีการต่อท้ายด้วยระบบสุญญากาศ (ตอนที่ 2) ที่ภาวะอัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส Time lag 1.5 ชั่วโมง และระดับสุญญากาศ -1.0 บาร์ พบว่าในการทดลองตอนที่ 2 ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระและร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ต่ำ

กว่าการทดลองตอนที่ 1 เล็กน้อยเนื่องจากปริมาณเมทานอลที่ลดลง ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงไม่จำเป็นที่จะต้องต่อท้ายด้วยระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.10 ผลของ Time lag ต่อร้อยละการเปลี่ยนของ FFA (อัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, -1.0 บาร์)



ภาพที่ 4.11 ผลของระดับสุญญากาศต่อร้อยละการเปลี่ยนของ FFA (อัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส Time lag 1.5 ชั่วโมง)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2

การทดลอง	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์
ตอนที่ 1	99.2 ± 0.0	96.7 ± 1.1
ตอนที่ 2	99.1 ± 0.0	95.0 ± 1.6

4.4 ผลการดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

เมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 84.2 ± 1.1 เพื่อต้องการเพิ่มเมทิลเอสเทอร์ให้เป็นไปตามมาตรฐานของประเทศไทย (ขั้นต่ำ 96.5) จึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินปฏิกิรยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่เชื่อมขวางมาดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันต่อ ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่าง PFAD และเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [1] พบว่าได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับร้อยละ 93.2 ± 2.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งยังคงต่ำกว่ามาตรฐานของประเทศไทยเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะภาวะในการดำเนินปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่นำมาใช้ยังไม่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.5 สมบัติของไบโอดีเซล

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มจากภาวะที่เหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของประเทศไทยและมาตรฐาน ASTM D6751-02 ได้แก่ ค่าไอโอดีน ค่าความเป็นกรด เมทิลเอสเทอร์ ความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ จุดขุ่น และ จุดเริ่มไหล ซึ่งแสดงว่าสมบัติสำคัญที่ยังต้องปรับปรุง คือ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยค่าความเป็นกรดที่สูงมากจากงานวิจัยนี้อาจเกิดจากเทคนิคการล้างของผู้วิจัยเองเป็นข้อผิดพลาดส่วนบุคคล (Human error)

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติของไบโอดีเซล

สมบัติ	หน่วยวัด	วิธีทดสอบ	ไบโอดีเซล	ไบโอดีเซลตามมาตรฐาน	
				ประเทศไทย	ASTM D6751-02
ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม	EN 14111	38.8 ± 0.2	ขั้นสูง 120	-
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮ-ดรอกไซด์ต่อกรัม	ASTM D664	3.9 ± 0.0	ขั้นสูง 0.5	ขั้นสูง 0.8
เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14103	93.2 ± 2.2	ขั้นต่ำ 96.5	-
ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที	ASTM D445	6.4 ± 0.0	3.5-5.0	1.9-6.0
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ASTM D93	174	ขั้นต่ำ 120	ขั้นต่ำ 130
จุดขุ่น	องศาเซลเซียส	ASTM D2500	20.0 ± 0.0	-	-3 ถึง 12
จุดเริ่มไหล	องศาเซลเซียส	ASTM D97	12.0 ± 0.0	-	-15 ถึง 10

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

ผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล พบว่าเมื่อทำการเติมปริมาณเมทานอลที่มากเกินพอลงไปมากขึ้นก็จะส่งผลทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเพิ่มสูงขึ้น

ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการที่ปริมาณกรดซัลฟิวริกมากขึ้นทำให้มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและดำเนินไปข้างหน้าได้มาก

ผลของอุณหภูมิ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ส่งผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้พลังงานจลน์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนแตกตัวทำให้ PFAD และเมทานอลเกิดการละลายเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาจึงดำเนินไปข้างหน้าได้มาก

ผลของการต่อท้ายเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานด้วยระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อมีการต่อท้ายเครื่องปฏิกรณ์ด้วยระบบสุญญากาศ ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระลดลงเล็กน้อย ซึ่งไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ว่าจะสามารถแยกผลิตภัณฑ์น้ำออกจากปฏิกิริยาได้มากขึ้น เนื่องจากเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นเกิดการระเหยและซึมผ่านเมมเบรนออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์น้ำด้วย ส่งผลทำให้สัดส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอลลดลง

5.1.2 ผลที่ได้จากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด

ชนิด	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์
เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่เชื่อมขวาง	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0	96.7 ± 1.1
เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0	93.8 ± 1.1
เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0	95.0 ± 0.1
เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป	98.6 ± 0.0	1.3 ± 0.0	92.0 ± 2.6

ดังนั้นการใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีสมบัติชอบน้ำ สามารถแยกผลิตภัณฑ์น้ำออกจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันได้ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระและร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป

5.2 **ข้อเสนอแนะ**

ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานโดยทำเป็นระบบต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

รายการอ้างอิง

[1] Hayyan, A., and others. Sludge palm oil as a renewable raw material for biodiesel production by two-step processes. Bioresource Technology 101 (2010): 7804–7811.

[2] Dube, M.A., Tremblay, A.Y., and Liu J. Biodiesel production using a membrane reactor. Bioresource Technology 98 (2007): 639–647.

[3] Balat, M., and Balat, H. Progress in biodiesel processing. Applied Energy 87 (2010): 1815–1835.

[4] Nicha, K., Khantong, S., and Warawut, C. Improving Cold Flow Properties of Biodiesel Produced from Palm Fatty Acid Distillate, TRF-Master Research Congress V (2011): 189.

[5] Sarkar, B., Sridhar, S., Saravanan, K., and Kale, V. Preparation of fatty acid methyl ester through temperature gradient driven pervaporation process. Chemical Engineering Journal 162 (2010): 609–615.

[6] Shailendra, S., Avinash, K. A., and Sanjeev, G. Biodiesel development from rice bran oil: Transesterification process optimization and fuel characterization. Energy Conversion and Management 49 (2008): 1248–1257.

[7] ศึกษาธิการ, กระทรวง. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). พลังงานทดแทน : ไบโอดีเซล (biodiesel)

[8] Avinash, K. A. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science 33 (2007): 233–271.

[9] Warakorn, M. Preparation of catalysts from natural dolomite for transesterification of vegetable oil. Master's Thesis, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2007.

[10] Fangrui, M., and Milford, A. H. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70 (1999): 1-15.

[11] Dennis, Y.C. L., Xuan, W., and Leung, M.K.H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. Applied Energy 87 (2010): 1083–1095.

[12] Barnwal, B.E., and Sharma, M.P. Prospects of bio diesel production from vegetable oils in India. Renewable and sustainable Energy Reviews 9 (2005): 363-378.

[13] วิทยาศาสตร์, กระทรวง. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น

[14] Joshi, R.M., and Pegg, M.J. Flow properties of biodiesel fuel blends at low temperatures. Fuel 86 (2007): 143-157.

[15] พลังงาน, กระทรวง. กรมธุรกิจพลังงาน. สำนักนโยบายและแผนยุทธศาสตร์. ข้อกำหนดสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบในประเทศไทย

[16] Sasipim, L. Mixed oxides of Ca, Mg, and Zn as heterogeneous base catalysts for transesterification of palm kernel oil. Master's Thesis, Department of Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2009.

[17] Gerhard, K. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. Fuel Processing Technology 86 (2005): 1059-1070.

[18] Mittelbach, M. Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: specifications and quality control of biodiesel. Bioresource Technolnology 56 (1996): 7-11.

[19] Chunshan, S., Chieh, S.H., and Isoa, M. Chemistry of Diesel Fuels New York: Taylor & Francis (2000): 7-10.

[20] Kittipong, M. Biodiesel production from oilseed palnts. Master's Thesis, Depart ment of Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2007.

[21] เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมวิชาการเกษตร. วิชาการปาล์มน้ำมัน. [ออนไลน์]. 2523. แหล่งที่มา: http://it.doa.go.th/palm/linkTechnical/oilpalm.html [12 กรกฎาคม 2554]

[22] ขันทอง สุนทราภา. <u>เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน</u>. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

[23] รัตนา จิระรัตนานนท์. <u>กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์</u>. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543. อ้างถึงใน พราหมณ์ ยอดจันทร์. <u>การแยกของผสมไลโคพีนและตัวทำละลายโดยเมมเบรนไคโตซาน</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552

[24] Yuexin, Z., Shanshan, X., Gongping, L., and Wanqin, J., Preparation of ceramic-supported poly (vinyl alcohol)–chitosan composite membranes and their applications in pervaporation dehydration of organic/water mixtures. <u>Journal of Membrane Science</u> 349 (2010): 341–348.

[25] สุวบุญ จิรชาญชัย รังรอง ยกส้าน และโกสุม สมัครรัตน์. <u>สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคติน-ไคโตซาน</u>. การประชุมเชิงปฏิบัติการไคตินและไคโตซานจากวัตถุดิบธรรมชาติ สู่การประยุกต์ใช้, 2544. อ้างถึงใน ชมพูนุช อุศรัตนิวาส. <u>การเตรียมและลักษณะสมบัติของเมมเบรนไคโตซาน/ซีโอไลต์สำหรับการแยกมีเทนในแก๊สชีวภาพ</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551

[26] Dube, M.A., Tremblay, A.Y., and Liu, J., Biodiesel production using a membrane reactor. <u>Bioresource Technology</u> 98 (2007): 639–647.

[27] Cao, P., Dube, M.A., and Tremblay, A.Y. Methanol recycling in the production of biodiesel in a membrane reactor, <u>Fuel</u> 87 (2008): 825–833.

[28] Atadashi, I.M., Aroua, M.K., and Aziz, A.A. Biodiesel separation and purification: A review. <u>Renewable Energy</u> 36 (2011): 437-443.

[29] Malaya, N., Meher, L.C., Naik, S.N., and Das, L.M. Production of biodiesel from high free fatty acid Karanja (Pongamia pinnata) oil. <u>Biomass and Bioenergy</u> 32 (2008): 354 – 357.

[30] Piyanuch, N., and Sasiwimol, W. High free fatty acid coconut oil as a potential feed-stock for biodiesel production in Thailand. <u>Renewable Energy</u> 35 (2010): 1682–1687.

[31] Gan, S., Ng, H.K., Oo,i C.W., Motala, N.O., and Ismail, M.A.F., Ferric sulphate catalysed esterification of free fatty acids in waste cooking oil. Bioresource Technology 101 (2010): 7338–7343.

[32] Gomes, M.C.S., Pereira, N.C., and Davantel, S.T., Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membranes. Journal of Membrane Science 352 (2010): 271–276.

[33] อัญชลี แท่นนิล, การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกรใบปาล์มและขยะของแข็งชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553

[34] PORIM Test Methods. Kuala Lumpur: Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM), 1995

[35] Atul, D., Kamath, M. G., and Raghavendra, R. H. Spunbond technology, (2004): 1-9.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์สมบัติไบโอดีเซล

1. วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D5554

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลาย Wijs
3. คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4)
4. โซเดียม ไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ความเข้มข้น 0.1 โมแลล
5. แป้ง (Starch)

นำน้ำมันปริมาณ 0.1 กรัม คาร์บอนเตตระคลอไรด์ปริมาตร 20 มิลลิลิตรและสารละลาย Wijs เติมลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเก็บขวดวัดปริมาตรไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ตามด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ของผสมดังกล่าวถูกไตเตรดด้วยโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ความเข้มข้น 0.1 โมแลล จนกระทั่งสารละลายสีเหลืองหายไป และเติมสารละลายแป้งซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ลงไปปริมาตร 2 มิลลิลิตรและทำการไตเตรดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสารละลายสีน้ำเงินหายไป เตรียม blank และดำเนินการเหมือนกับน้ำมัน ทำการบันทึกปริมาตรของโซเดียมไธโอซัลเฟต และนำมาคำนวณดังสมการ

ค่าไอโอดีนสามารถคำนวณได้ดังนี้

ค่าไอโอดีน = (B-S) × N × 12.69 / น้ำหนักของน้ำมัน

B = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ไตเตรดกับ blank

S = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ไตเตรดกับน้ำมัน

N = โมแลลิตีของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

2. วิธีวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลายโพรพานอล
3. โทลูอีน
4. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

นำน้ำมันปริมาณดังแสดงในตารางด้านล่าง ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วเติมสารผสมระหว่างโพรพานอลกับโทลูอีนปริมาณ 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ไตเตรดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูและคงตัวอยู่เป็นเวลา 30 วินาที บันทึกปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และนำมาคำนวณดังสมการ

ค่าความเป็นกรด	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	ความละเอียดในการชั่ง (กรัม)
0.05-1.0	20.0 ± 2.0	0.10
1.0-5.0	5.0 ± 0.5	0.02
5-20	1.0 ± 0.1	0.005
20-100	0.25 ± 0.02	0.001
100-260	0.10 ± 0.01	0.0005

ค่าความเป็นกรดสามารถคำนวณได้ดังนี้

ค่าความเป็นกรด = 56.1 × N × V / น้ำหนักของน้ำมัน

N = โมแลลิตีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

V = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรด

3. วิธีวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN14103

สารเคมี

1. สารละลายเฮกเซน
2. สารมาตรฐานเมทิลเฮปตะเดคะโนเอท (Methylheptadecanoate)

นำน้ำมันปริมาณ 0.2 กรัม ชั่งสารมาตรฐานเมทิลเฮปตะเดคะโนเอทปริมาณ 0.2 กรัม เติมลงในขวดแก้วขนาดเล็ก และเติมสารละลายเฮกเซนลงไปจนได้ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแบบแก๊ส (Gas chromatography) ผลที่ได้จะออกมาในรูปของกราฟ หลังจากนั้นจึงนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้มาคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ดังสมการ

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณเมทิลเอสเทอร์} = \frac{(\text{area.sample} \times \text{wt.std})}{(\text{area.std} \times \text{wt.sample})} \times 100$$

Area sample = พื้นที่ใต้กราฟของน้ำมัน

Area std = พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานเมทิลเฮปตะเดคะโนเอท

wt. sample = น้ำหนักของน้ำมัน

wt. std = น้ำหนักของสารมาตรฐานเมทิลเฮปตะเดคะโนเอท

4. วิธีวิเคราะห์ความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445

เลือกวิสโคมิเตอร์ (viscometer) ที่แห้งและสะอาดตามชนิดที่เหมาะสมกับงานที่จะใช้ เช่น ถ้าความหนืดมากควรเลือกวิสโคมิเตอร์ที่มีขนาดกว้าง ถ้าความหนืดต่ำควรเลือกวิสโคมิเตอร์ที่มีขนาดแคบ โดยเวลาที่ใช้ในการทดลองช่วงระหว่างชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ไม่ควรต่ำกว่า 200 วินาที และไม่เกิน 1000 วินาที นำน้ำมันใส่ในวิสโคมิเตอร์โดยใช้วิธีคว่ำวิสโคมิเตอร์ให้ทางด้านที่ไม่มีจุดจับเวลา (ด้านเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก) จุ่มในน้ำมันแล้วใช้ suction ดูดอีกทางหนึ่ง จนได้ปริมาณน้ำมันตามที่วิสโคมิเตอร์นั้นกำหนด

นำวิสโคมิเตอร์ไปแขวนในอ่างวิสโคมิเตอร์ ซึ่งมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของอ่างประมาณ 30 นาที ใช้ suction ปรับให้ระดับบนของน้ำมันอยู่สูงกว่าจุดจับเวลาจุดแรกประมาณ 5 มิลลิเมตร ปล่อยให้น้ำมันไหลอย่างอิสระ เริ่มจับเวลาเมื่อระดับบนไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรกและหยุดเมื่อถึงจุดสุดท้าย บันทึกเวลาในการทดลอง

ค่าความหนืดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าความหนืด} = C \times t$$

C = ค่าคงที่ของวิสโคมิเตอร์ (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที^{2})

t = เวลาในการไหลของน้ำมัน (วินาที)

5. วิธีวิเคราะห์จุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D93

จุดวาบไฟเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่สารจะให้ไอระเหยออกมาได้มากพอ และสามารถลุกติดไฟได้เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟ และเมื่อไอระเหยของสารหมดไปไฟก็จะดับ แต่หากอุณหภูมิของสารสูงขึ้นเกินกว่าจุดวาบไฟทำให้สารให้ไอระเหยออกมาได้อีก ก็จะเกิดการลุกติดไฟต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ที่อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดไหม้ไฟ มักจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 10-20 องศาเซลเซียส โดยปกติแล้วของแข็งหรือของเหลวไวไฟไม่ได้ลุกติดไฟ แต่จะให้ไอระเหยออกมาซึ่งไอระเหยนี้เมื่อผสมกับอากาศจนได้สัดส่วนพอดีจะสามารถลุกติดไฟได้เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟ

การทดสอบสามารถทดสอบได้ 2 วิธี คือ แบบเปิดและแบบปิด โดยเครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดลองวัดจุดวาบไฟทั้ง 2 วิธีนี้ได้แก่

1. Cleveland Open Cup Tester: เครื่องนี้สามารถวัดจุดวาบไฟโดยอาศัยการให้ความร้อนกับน้ำมันแล้วไอระเหยที่ได้จะผ่านเปลวไฟที่อยู่เหนือ Test cup และเกิดการวาบไฟ และลุกติดไฟขึ้น โดยก่อนจะถึงจุดวาบไฟจะเกิดปรากฏการณ์ Blue halo ซึ่งยังไม่ใช่จุดวาบไฟ สำหรับการทดสอบนี้ใช้ได้กับทุกผลิตภัณฑ์ของปิโตรเลียม โดยจะต้องมีค่าจุดวาบไฟอยู่ระหว่าง 79-400 องศาเซลเซียส

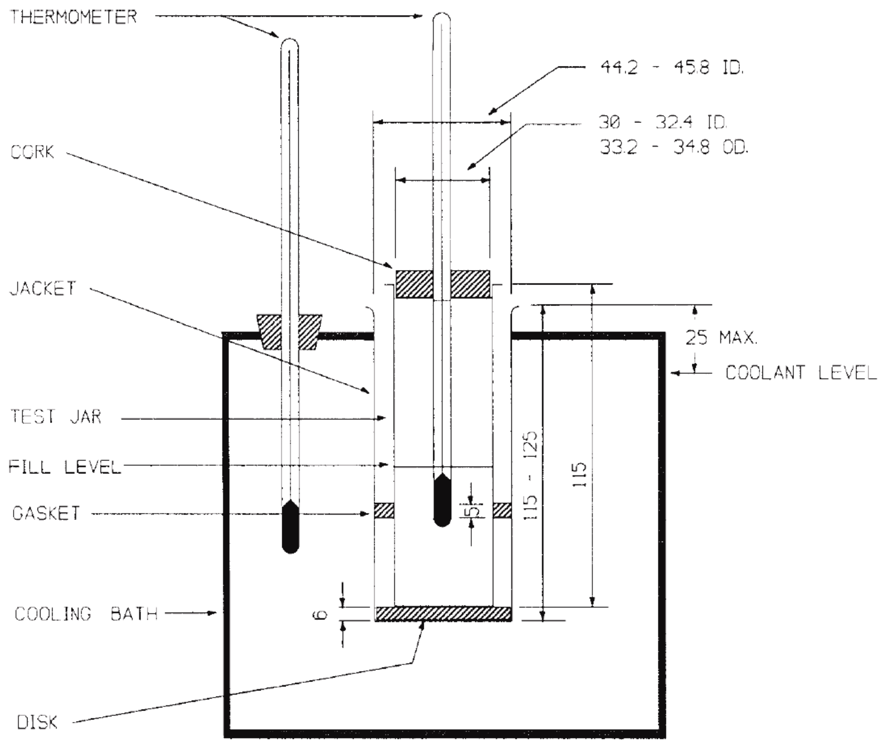
2. Pensky-Martens Closed Cup Tester: ใช้หลักการเดียวกับเครื่อง Cleveland Open Cup Tester แต่แตกต่างตรงที่เครื่อง Pensky-Martens Closed Cup Tester นี้จะมีแท่งกวนน้ำมันที่ต้องการทดสอบด้วยและหัวไฟที่ใช้จะติดด้วยไฟฟ้า สำหรับการทดสอบนี้ใช้ได้กับวัสดุที่มีค่าจุดวาบไฟอยู่ระหว่าง 40-360 องศาเซลเซียส

6. **วิธีวิเคราะห์จุดขุ่น** (Cloud point) **ตามมาตรฐาน** ASTM D2500

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย หลอดแก้วทรงกระบอก, เทอร์โมมิเตอร์ และอ่างรักษาความเย็น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบแสดงให้เห็นครั้งแรกที่อย่างน้อยที่สุด 14 องศาเซลเซียส ความชื้นที่มีอยู่ในเครื่องมือถูกกำจัดโดยการใช้กระดาษกรองที่แห้ง อุณหภูมิที่อ่างเก็บความเย็นอยู่ที่ 0.0 ± 1.5 องศาเซลเซียส ในการทดสอบจะต้องทำการหยิบขึ้นมาดูทุก 1 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีการเกิดการขุ่นที่ก้นหลอดในขณะเดียวกันทำการบันทึกอุณหภูมิที่ปรากฏ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจุดขุ่นเป็นดังรูป ก-1

7. **วิธีวิเคราะห์จุดเริ่มไหล** (Pour point) **ตามมาตรฐาน** ASTM D97

จุดเริ่มไหล คือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่น้ำมันไม่เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ชนิดเดียวกันกับการทดสอบหาจุดขุ่น ได้แก่ หลอดแก้วทรงกระบอก, เทอร์โมมิเตอร์ และอ่างรักษาความเย็น อุณหภูมิที่อ่างเก็บความเย็นอยู่ที่ 0.0 ± 1.5 องศาเซลเซียส ในการทดสอบจะต้องทำการหยิบขึ้นมาดูทุก 3 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำมันไม่สามารถไหลได้ในขณะเดียวกันทำการบันทึกอุณหภูมิที่ปรากฏ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจุดขุ่นเป็นดังรูป ก-1



ภาพที่ ก-1 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาจุดขุ่นและจุดเริ่มไหล

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

น้ำหนักของเมมเบรนแห้ง = 0.0302 กรัม
น้ำหนักของเมมเบรนเปียก = 0.0535 กรัม

$$\text{ปริมาณการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักเมมเบรนเปียก - น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}}{\text{น้ำหนักเมมเบรนแห้ง}}$$

$$= \frac{(0.0535 - 0.0302)}{0.0302}$$

$$= 0.77 \quad \text{กรัมต่อกรัม}$$

2. ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

ปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (Q) = 0.005 ลิตร
พื้นที่ผิวของเมมเบรน (A) = 1.1341×10^{-3} ตารางเมตร
เวลาที่เก็บเพอร์มิเอต (Δt) = 1.79 ชั่วโมง

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

$$= \frac{0.005}{(1.1341 \times 10^{-3})(1.79)}$$

$$= 2.46 \quad \text{ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง}$$

3. ค่าร้อยละการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล

ตัวอย่างการคำนวณค่าร้อยละการกักกันไบโอดีเซล

ความเข้มข้นทางด้านเพอร์มิเอต (C_p) = 0.0 ร้อยละโดยน้ำหนัก

ความเข้มข้นทางด้านป้อน (C_f) = 82.64 ร้อยละโดยน้ำหนัก

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

$$= \left(1 - \frac{0}{82.64}\right) \times 100$$

$$= 100$$

4. ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ = 0.23 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ = 0.25 โมลาร์

น้ำหนักของน้ำมัน = 2.02 กรัม

ร้อยละของกรดไขมันอิสระ =

$$\frac{\text{ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์} \times \text{ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์} \times 25.6}{\text{น้ำหนักของน้ำมัน}}$$

$$\text{ร้อยละของกรดไขมันอิสระ} = \frac{(0.23 \times 0.25 \times 25.6)}{2.02}$$

$$= 0.73$$ โดยน้ำหนัก

5. ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ

ปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น	=	87.07	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ	=	0.73	ร้อยละโดยน้ำหนัก

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยน} = \frac{\text{กรดไขมันอิสระเริ่มต้น - กรดไขมันอิสระที่เหลือ}}{\text{กรดไขมันอิสระเริ่มต้น}} \times 100$$

$$= \frac{(87.07 - 0.73)}{87.07} \times 100$$

$$= 99.17\%$$

6. ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	=	84.17	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปริมาณกรดไขมันอิสระ	=	87.07	ร้อยละโดยน้ำหนัก

$$\text{ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักเอสเทอร์}}{\text{น้ำหนักกรดไขมันอิสระเริ่มต้น}} \times 100$$

$$= \frac{84.17}{87.07} \times 100$$

$$= 96.67\%$$

7. ค่าไอโอดีน ASTM D5554

ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
ที่ไตเตรดกับ blank (B) = 30.5 มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
ที่ไตเตรดกับน้ำมัน (S) = 24.4 มิลลิลิตร
สารละลายโซเดียม ไธโอซัลเฟต (N) = 0.1 โมแลล

ค่าไอโอดีน = (B - S) × N × 12.69 / น้ำหนักของน้ำมัน

= (30.5 – 24.4) × 0.1 × 12.69 / 0.2

= 38.7 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมของน้ำมัน

8. ค่าความเป็นกรด ASTM D664

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (N) = 0.1 โมแลล
สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
ที่ใช้ไตเตรดกับน้ำมัน (V_{sample}) = 0.8 มิลลิลิตร
สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
ที่ใช้ไตเตรดกับ blank (V_{blank}) = 0.1 มิลลิลิตร

ค่าความเป็นกรด = 56.1 × N × (V_{sample}- V_{blank}) / น้ำหนักของน้ำมัน

= 56.1 × 0.1 × (0.8 – 0.1) / 1.0

= 3.93 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของน้ำมัน

9. ค่าความหนืด ASTM D445

ค่าคงที่ของวิสโคมิเตอร์ (C)	=	0.008551	ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที^{2}
เวลาในการไหลของน้ำมัน (t)	=	751.8	วินาที

ค่าความหนืด = C × t

= (0.008551 × 751.8)

= 6.4 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

1. ความสามารถในการแพร่ผ่านน้ำบริสุทธิ์

ตารางที่ ค.1-1 ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรน	ความดันที่เป็นแรงขับ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ค่าฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตร ไม่มีการเชื่อมขวาง	100	0.97 ± 0.01
	200	1.74 ± 0.02
	300	2.42 ± 0.04
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตร มีการเชื่อมขวาง	100	0.67 ± 0.01
	200	1.40 ± 0.02
	300	1.90 ± 0.01

2. ความสามารถในการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล

ตารางที่ ค. 2-1 แสดงค่าร้อยละการกักกันดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มและไบโอดีเซล

ชนิดของเมมเบรน	ร้อยละการกักกัน (%R)	
	ดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์ม	ไบโอดีเซล
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตร ไม่มีการเชื่อมขวาง	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0
เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตร มีการเชื่อมขวาง	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0
เมมเบรนไคโตซาน แบบคอมพอสิต	0.0 ± 0.0	1.4 ± 0.8

3. การผลิตไบโอดีเซลจากดิสทิลเลตกรดไขมันปาล์มผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซาน

3.1 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวาง

ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:8 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองเป็นดังตารางที่ ค. 3-1

ตารางที่ ค.3-1 ผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:8 โมลต่อโมล

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	98.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1
2	98.8 ± 0.1	1.1 ± 0.1
3	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
4	99.1 ± 0.1	0.8 ± 0.0
5	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0
6	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0
7	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
8	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
9	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
10	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0

ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองเป็นดังตารางที่ ค. 3-2

ตารางที่ ค. 3-2 ผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
2	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0
3	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0
4	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0
5	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
6	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
7	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
8	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.1
9	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.1
10	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.1

ตารางที่ ค. 3-3 ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	98.3 ± 0.0	1.5 ± 0.0
2	98.7 ± 0.0	1.1 ± 0.0
3	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0

ตารางที่ ค. 3-4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
50	98.6 ± 0.0	1.3 ± 0.0
60	99.2 ± 0.0	0.7 ± 0.0

3.2 การต่อท้ายเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรไม่มีการเชื่อมขวางด้วยระบบสุญญากาศ

ตารางที่ ค. 3-5 ผลของ Time lag ของการสร้างสุญญากาศ

Time lag (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
0.5	99.10 ± 0.00	0.80 ± 0.00
1	99.12 ± 0.01	0.78 ± 0.01
1.5	99.13 ± 0.00	0.77 ± 0.01

ตารางที่ ค. 3-6 ผลของระดับสุญญากาศท้ายเมมเบรน

ระดับสุญญากาศ (บาร์)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
-0.5	99.10 ± 0.00	0.80 ± 0.00
-0.75	99.11 ± 0.00	0.79 ± 0.01
-1.0	99.13 ± 0.00	0.77 ± 0.01

3.3 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนเมมเบรนไคโตซานแบบสมมาตรมีการเชื่อมขวาง

ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:8 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองเป็นดังตารางที่ ค. 3-7

ตารางที่ ค.3-7 ผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:8 โมลต่อโมล

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	98.8 ± 0.0	1.1 ± 0.0
2	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
3	98.8 ± 0.0	1.0 ± 0.0
4	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
5	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
6	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
7	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
8	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
9	98.8 ± 0.0	1.1 ± 0.0
10	98.8 ± 0.0	1.1 ± 0.0

ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองเป็นดังตารางที่ ค. 3-8

ตารางที่ ค.3-8 ผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
2	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
3	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
4	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
5	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
6	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
7	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
8	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
9	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0
10	98.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0

ตารางที่ ค. 3-9 ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	97.8 ± 0.0	2.0 ± 0.0
2	98.6 ± 0.0	1.2 ± 0.0
3	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0

ตารางที่ ค. 3-10 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
50	98.6 ± 0.0	1.3 ± 0.0
60	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0

3.4 เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนเมมเบรนไคโตซานแบบคอมพอสิต

ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:8 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองเป็นดังตารางที่ ค. 3-11

ตารางที่ ค.3-11 ผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:8 โมลต่อโมล

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	98.8 ± 0.0	1.0 ± 0.0
2	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
3	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
4	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
5	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
6	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
7	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
8	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
9	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
10	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0

ที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองเป็นดังตารางที่ ค. 3-12

ตารางที่ ค.3-12 ผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนระหว่าง PFAD ต่อเมทานอล 1:9 โมลต่อโมล

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
2	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0
3	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
4	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
5	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
6	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
7	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
8	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
9	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0
10	99.0 ± 0.0	0.9 ± 0.0

ตารางที่ ค. 3-13 ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	98.3 ± 0.0	1.5 ± 0.0
2	98.7 ± 0.0	1.2 ± 0.0
3	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0

ตารางที่ ค. 3-14 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
50	98.5 ± 0.0	1.3 ± 0.0
60	99.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเบญจพร มีมุข เกิดวันที่ 23 มกราคม 2531 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2554 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The first asean plus three graduate research congress (AGRC 2012)