การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

ปริญญานิพนธ์

ของ

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

มีนาคม 2555

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

ปริญญานิพนธ์

ของ

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

มีนาคม 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

บทคัดย่อ

ของ

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

มีนาคม 2555

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์. (2555). *การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์.* ปริญญานิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร, รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำกลับมาใช้ผลิตไบโอดีเซลซ้ำ เพื่อลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล และศึกษาคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ผลการวิจัยพบว่า

1. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสที่ถูกตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ มีค่าเท่ากับร้อยละ 88.88 และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลคือ 1:4 และมีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย (1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปร้อยละ 90 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 (1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง พบว่า ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้เท่ากับ 94.61

2. สมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่า ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือเท่ากับ 45.38 เมื่อเทียบกับร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ครั้งแรก สรุปว่าสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปมีความเสถียรภาพและคงตัวต่ำ จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่และต่อเนื่องได้หลายครั้ง จึงเป็นเหตุผลทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้

3. การทดสอบคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 พบว่า มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 94.61 ความหนาแน่น 900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ความหนืด 28.56 เซนติสโตกส์ จุดวาบไฟ 170 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด 40 เมื่อเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐานตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน

BIODIESEL PRODUCTION FROM PALM OIL USING LIPASE IMMOBILIZED ON MONTMORILLONITE

AN ABSTRACT

by

PUTTIPHAT BENJAPREECHAPHAT

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Master of Education Degree in Industrial Education

at Srinakharinwirot University

March 2012

Puttiphat Benjapreechaphat. (2012). *Biodiesel Production from Palm Oil Using Lipase Immobilized on Montmorillonite.* Master thesis, M.Ed. (Industrial Education). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr. Pairust Vongyuttakai, Assoc. Prof. Sompol Mongkolpitaksuk.

The purposes of this thesis were to produce biodiesel from palm oil using lipase immobilized on montmorillonite study the reusability of the immobilized enzyme to reduce the cost of biodiesel production and quality of biodiesel from palm oil.

The results of this thesis found that:

1. Biodiesel production from palm oil using lipase was immobilized on montmorillonite by physical adsorption in 88.88%. The conditions in the production of methyl ester were optimized as follow; mole ratio of palm oil and methanol 1: 4, hexane as solvent (1:1 by weight per volume), weight percent of immobilized lipase on montmorillonite to palm oil is 90%, 0.1 M phosphate buffer solution pH 7 (1:2 by weight per volume) at 45 °C for 96 hours. In these optimized conditions methyl ester were produced in 94.61%.

2. The reusability of the immobilized enzyme decreased due to the amount of methyl ester was reduced to 45.38% compared with the original batch. It is concluded that the performances of immobilized enzymes are lower in stability and constancy. There can not be reused several times continuously. The reason is that it is not worth to use them economically. Thus lipase immobilized on montmorillonite is not suitable to use as a catalyst in biodiesel production.

3. The quality of biodiesel produced when compared with the standard of quality diesel engines for agriculture (Biodiesel Community) announced by the Department of Energy Business, Ministry of Energy of Thailand, 2006. Biodiesel produced were found that the percentage of the amount of methyl ester (94.61), density (900 Kg/m^3) , viscosity (28.56 cSt), flash point (170 ° C) and acid value (40). They do not follow the standard of quality required by the Department of Energy Business, Ministry of Energy of Thailand.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

ของ

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์	คณะกรรมการสอบปากเปล่า
..... ประธาน	..... ประธาน
(อาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)	(อาจารย์ ดร. อัมพร กุญชรรัตน์)
..... กรรมการ	..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข)	(อาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)
	..... กรรมการ
	(รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข)
	..... กรรมการ
	(อาจารย์ ดร. สุธี ชุติไพจิตร)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จากอาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และคณะกรรมการแต่งตั้งเพิ่มเติม อาจารย์ ดร. อัมพร กุญชรรัตน์ และอาจารย์ ดร. สุธี ชุติไพจิตร ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ หัวหน้าภาควิชาเคมี หัวหน้าภาควิชาชีววิทยา คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ เช่น สถานที่ห้องปฏิบัติการเคมี สารเคมี และอุปกรณ์เครื่องมือวิทยาศาสตร์แก่ผู้วิจัยให้สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ ถูกต้อง ทั้งทางตรงและทางอ้อม จนปริญญานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ นางสาวรยากร นกแก้ว ผู้เชี่ยวชาญ ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สารตัวอย่างน้ำมันปาล์มและคุณภาพของไบโอดีเซลตัวอย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัทปาล์มทองออยล์จำกัด ที่อยู่ 121/4 หมู่ 6 ต.ท่าแซะ อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร ที่เอื้อเฟื้อน้ำมันปาล์มดิบในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ เพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องในสาขาอุตสาหกรรมศึกษาทุกท่าน และอีกทั้งเพื่อนพ้องทุกท่านที่ให้คำแนะนำ แรงจูงใจสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีกำลังใจในการทำงานวิจัยได้สำเร็จเป็นอย่างดีมาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง และญาติๆ ที่ให้กำลังใจในการศึกษาเสมอมา คอยช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คุณค่าและคุณงามความดีของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบูชาแด่พระคุณของบิดา มารดา บูรพาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย และขอมอบแด่บุคคลผู้อยู่เบื้อหลังของความสำเร็จนี้ สิ่งดีๆ เหล่านี้ผู้วิจัยทราบซึ้งในไมตรีจิต และจะขอเก็บความทรงจำนี้ตลอดไป จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน มา ณ โอกาสนี้ด้วย

พุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ภูมิหลัง	1
	ความมุ่งหมายของงานวิจัย	4
	ความสำคัญของการวิจัย	4
	ขอบเขตของการวิจัย	4
	ตัวแปรที่ศึกษา	5
	นิยามศัพท์เฉพาะ	6
	กรอบแนวคิดของการวิจัย	7
	สมมติฐานของการวิจัย	7
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	8
	ไบโอดีเซล	8
	ประเภทของไบโอดีเซล	10
	คุณสมบัติของไบโอดีเซล	12
	จุดอ่อนของไบโอดีเซล	13
	การใช้ไบโอดีเซลในต่างประเทศ	13
	การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย	14
	ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล	15
	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	17
	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	23
	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	25
	น้ำมันพืช	25
	ปาล์มน้ำมัน	26
	ลักษณะทางอนุกรมวิธานของปาล์มน้ำมัน	27
	พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ปลูกในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน	27
	กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม	29
	คุณสมบัติของน้ำมันพืช	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2 (ต่อ)		
	ลิปิด	34
	ประเภทของลิปิด	34
	ประเภทกรดไขมันตามความอิ่มตัว	36
	แอลกอฮอล์	40
	การเรียกชื่อสารประกอบแอลกอฮอล์	41
	สมบัติทั่วไปของแอลกอฮอล์	41
	แหล่งกำเนิดของแอลกอฮอล์	42
	เอนไซม์	43
	สมบัติทั่วไปของเอนไซม์	43
	เอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์	45
	ตัวเร่งปฏิกิริยา	45
	ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา	46
	เอนไซม์ตรึงรูป	46
	การตรึงเอนไซม์	46
	ข้อดีและข้อเสียของเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้เปรียบกว่าเอนไซม์อิสระ	47
	ประเภทของเอนไซม์ตรึงรูป	47
	ตัวพยุงสำหรับตรึงเอนไซม์	50
	วิธีตรึงเอนไซม์	51
	เอนไซม์ไลเปส	53
	คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ	54
	แร่ดินเหนียว	56
	การจำแนกแร่ตามการกำเนิด	56
	แร่มอนต์มอริลโลไนต์	61
	สมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์	64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ **หน้า**

2 (ต่อ)

การใช้ประโยชน์ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์..... 66

สมบัติและมาตรฐานของไบโอดีเซล 67

ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 71

ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2550..... 73

ทฤษฎีการผลิต..... 75

แนวคิดเกี่ยวกับการผลิต..... 75

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 77

งานวิจัยของในประเทศ 77

งานวิจัยของต่างประเทศ..... 78

3 **วิธีดำเนินการวิจัย**..... 81

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 81

ตัวแปรที่ศึกษา 82

ตัวแปรต้น..... 82

ตัวแปรตาม 82

ตัวแปรควบคุม..... 82

สถานที่ในการวิจัย..... 83

วิธีดำเนินการวิจัย..... 83

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 83

หาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล..... 84

การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล 87

การนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ใหม่ 87

ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วย..... 87

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล..... 95

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	**ผลการวิเคราะห์ข้อมูล**	96
5	**สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ**	111
	สรุปผลการวิจัย	111
	อภิปรายผลการวิจัย	116
	ข้อเสนอแนะ	125
	ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	125
	ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป	127
	ตารางสรุปภาพรวมของการวิจัย	128
บรรณานุกรม		131
ภาคผนวก		138
	ภาคผนวก ก การคำนวณและการเตรียมสารเคมี	139
	ภาคผนวก ข การหาปริมาณโปรตีนและหาปริมาณโปรตีนที่ยึดเกาะ	145
	ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซล โดยหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester yield or FAME) ในไบโอดีเซลที่ได้	148
	ภาคผนวก ง ภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	152
	ภาคผนวก จ หนังสือขอความอนุเคราะห์	157
	ภาคผนวก ฉ ประวัติย่อผู้เชี่ยวชาญ	161
	ภาคผนวก ช รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล	166
	ภาคผนวก ซ หนังสือสำคัญแสดงการเปลี่ยนชื่อตัว-ชื่อสกุล	168
ประวัติย่อผู้วิจัย		172

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	ปริมาณมลพิษในไอเสียที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไบโอดีเซล 100 % (B100) และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล 20 % (B20)	14
2	เปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสกับเอนไซม์ในการผลิตไบโอดีเซล	22
3	ปริมาณการผลผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย (หน่วย : พันตัน)	26
4	ลักษณะพันธุ์ปาล์มน้ำมัน	28
5	องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มและองค์ประกอบอื่นที่สำคัญในน้ำมันปาล์มดิบ	39
6	แอลกอฮอล์ที่เป็นอนุพันธ์ของอัลเคนที่เกิดจากการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่ไฮดรอกซิล	41
7	ข้อดีและข้อเสียการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีต่างๆ	53
8	จุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ทางการค้าบางส่วน	54
9	เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของแร่ดินเหนียวซิลิเกตที่สำคัญๆ สามชนิด	64
10	กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549	71
11	กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550	73
12	แสดงปริมาณโปรตีนก่อน-หลังการตรึงเอนไซม์ และร้อยละของการตรึงเอนไซม์บนมอนต์มอริลโลไนต์ จากการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ	97
13	แสดงผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์	98
14	แสดงผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เตรียมได้ต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์	99
15	แสดงผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้	101
16	แสดงผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์	103
17	แสดงผลของปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์	105
18	แสดงผลผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสม จากผลการทดลอง	107

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง **หน้า**

19 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้เทียบกับข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล สำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549..... 108

20 แสดงเปรียบเทียบผลผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะของการผลิตโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปครั้งแรกกับการใช้เอนไซม์ตรึงรูปซ้ำอีกครั้ง..... 109

21 แสดงรายการราคาต้นทุนผันแปรของการผลิตไบโอดีเซล..... 110

22 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลลูกผสมในอัตราส่วนต่างๆ..... 124

23 แสดงค่าของ retention time ของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด..... 149

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1	กรอบแนวคิดของการวิจัย	7
2	การผลิตไบโอดีเซลจากพืชหรือสัตว์	10
3	การผลิตไบโอดีเซลแบบลูกผสม	11
4	การผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์	12
5	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์	19
6	ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระ	19
7	ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระโดยความร้อน	20
8	ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันจากเอสเทอร์ในปฏิกิริยาที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ	20
9	ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส	20
10	ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	21
11	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	21
12	แผนผังการผลิตไบโอดีเซล (ก) โดยใช้เบส และ (ข) โดยใช้เอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	23
13	พันธุ์ปาล์มน้ำมันชนิดต่างๆ	28
14	ขั้นตอนในการหีบน้ำมันปาล์มดิบแบบแยกเปลือกและเมล็ดในโดยใช้น้ำ	30
15	โครงสร้างการผลิต การตลาด ปาล์มน้ำมัน และน้ำมันปาล์มของไทย	33
16	โครงสร้างของกลีเซอรอล	34
17	โครงสร้างของกลีเซอไรด์ชนิดต่างๆ	35
18	ปฏิกิริยาการเตรียมเมทานอลในระดับอุตสาหกรรม	42
19	การจับระหว่างเอนไซม์กับสับสเตรททำให้เกิดผลิตผลใหม่	44
20	การเปลี่ยนพลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนสารทั้งในกรณีที่ไม่มีเอนไซม์ E_a (- - -) และมีเอนไซม์ E_a^E (——)	44
21	แสดงการตรึงเอนไซม์	48
22	วิธีตรึงเอนไซม์เพื่อให้ได้เอนไซม์ตรึงรูปที่ไม่ละลายน้ำ	49
23	การเร่งย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ตรงตำแหน่งที่ 1 และ 3 ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์	55
24	การเร่งย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ตรงตำแหน่งที่ 1, 2 หรือ 3 ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์	55

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

25 (ก) Tetrahedron หนึ่งหน่วย (ข) โครงสร้างเป็นแผ่นที่เกิดจาก Tetrahedron หกหน่วย มาจับกันเป็นรูปหกเหลี่ยม เกิดเป็นแผ่น Tetrahedral 59

26 (ก) Octahedron หนึ่งหน่วย (ข) โครงสร้างเป็นแผ่นที่เกิดจาก Octahedron สี่หน่วย มาจับกันเกิดเป็นแผ่น Octahedral 59

27 (ก) การเชื่อมของแผ่น Octahedral และ Tetrahedral เกิดเป็นชั้น แบบ 1:1 และ 1:2 (ข) แสดงองค์ประกอบพื้นฐานในผลึกของแร่ดินเหนียว..... 60

28 ลักษณะโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์..... 62

29 แร่มอนต์มอริลโลไนต์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope)..... 62

30 ปริมาณธุรกิจ ณ ระดับจุดคุ้มทุน..... 77

31 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา..... 88

32 แผนผังการศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์..... 89

33 แผนผังการศึกษาผลของเวลาและปริมาณของเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์..... 90

34 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ 91

35 แผนผังการศึกษาปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ 92

36 แผนผังการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์..... 93

37 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์..... 94

38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์.... 99

39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์.. 100

40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้เอนไซม์ตรึงรูปที่เตรียมได้..... 102

41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่บ่มต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์..... 104

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์..... 106

43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสม โดยให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์..... 107

44 การกำจัดยางเหนียวออกจากน้ำมันปาล์มดิบ 140

45 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 โดยวัดด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์..... 141

46 กราฟมาตรฐานของสารละลายโปรตีน BSA ที่ความเข้มข้นต่างๆ 147

47 โครมาโทรแกรมของเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลตัวอย่าง 150

48 การเตรียมตัวพยุง 153

49 วิธีการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ..... 154

50 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสม..... 156

บทที่ 1
บทนำ

ภูมิหลัง

"พลังงาน" (Energy) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้โลกปัจจุบันสามารถขับเคลื่อนไปข้างหน้า และไม่มีที่สิ้นสุด มนุษย์ค้นพบแหล่งพลังงานในธรรมชาติที่สะสมมานานนับศตวรรษ พลังงานเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการพื้นฐานของมนุษย์และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม หากโลกมีการใช้พลังงานที่เป็นอยู่และไม่มีการค้นพบเพิ่มเติมแล้วคาดว่าโลกจะมีแหล่งสำรองพลังงาน ดังเช่น ณ ต้นปี พ.ศ. 2550 น้ำมัน ปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้วของน้ำมันโลกมีทั้งหมด 1,208 พันล้านบาร์เรล ใช้ไปได้อีกประมาณ 40 ปี ก๊าซธรรมชาติ มีทั้งหมด 181 ล้านล้านลูกบาศก์เมตร ใช้ได้อีกประมาณ 63 ปี ส่วนถ่านหิน มีทั้งหมด 909 พันล้านตัน ใช้ได้อีกประมาณ 147 ปี โดยแหล่งพลังงานดังกล่าวจะกระจายอยู่ในภูมิภาคต่างๆ ของโลก (เราเหลือพลังงานในโลก อีกแค่ไหน ?. 2551: 43-44) ซึ่งสัดส่วนในการใช้พลังงานจากแหล่งต่างๆ ของโลกในอีก 30 ปี ข้างหน้า (ปี 2573) พลังงานที่ได้จากน้ำมันมีสัดส่วนการใช้มากที่สุดเป็นร้อยละ 34 รองลงมาคือ พลังงานที่ได้จากถ่านหิน ร้อยละ 28 ก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 25 พลังงานจากนิวเคลียร์ ร้อยละ 5 เชื้อเพลิงจากไม้และสิ่งเหลือใช้ ร้อยละ 5 และพลังงานหมุนเวียน ร้อยละ 1 (คณะผู้แทนไทยประจำประชาคมยุโรป. 2549: ออนไลน์)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ระหว่างกำลังพัฒนา มีความเจริญก้าวหน้าทั้งทางด้านสังคมเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศ แต่จุดอ่อนอย่างหนึ่งของประเทศไทยคือ ปัญหาด้านพลังงาน ซึ่งประเทศไทยขาดแหล่งพลังงานที่เพียงพอในการพัฒนาประเทศ และปัญหานี้ก็ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ การค้า การส่งออกและการบริการต่างๆ รวมถึงการดำเนินชีวิตของประชาชน พบว่าในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดีเซลในปริมาณมากถึง 50.6 ล้านลิตรต่อวัน หรือสามารถคิดเป็นร้อยละ 46.1 ของปริมาณน้ำมันที่ใช้ภายในประเทศ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2553: 25-30) เป็นสัดส่วนการใช้สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จึงกลายเป็นพลังงานหลักของประเทศ แต่ประเด็นของราคาน้ำมันดีเซลในประเทศหลังจากที่รัฐบาลมีนโยบายปรับราคาให้สะท้อนกับความเป็นจริง ทำให้ราคาน้ำมันดีเซลเกิดการผันผวนเป็นอย่างมาก มีโอกาสการเปลี่ยนแปลงเป็นไปทิศทางเพิ่มมากกว่าทางลด ทำให้ผู้ประกอบการต่างต้องหันมาคิดว่าจะทำอย่างไรให้ต้นทุนการผลิตของหน่วยงานของตนนั้นต่ำที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่แน่นอนของราคาน้ำมันดีเซล พร้อมทั้งเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน และมีศักยภาพในการแข่งขันได้ จึงต้องเริ่มจากการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เร่ง

พัฒนาพลังงานทดแทนที่มีอยู่ในประเทศขึ้นมาทดแทนเชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil fuel) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสำรองที่มีอยู่อย่างจำกัด

การแสวงหาพลังงานใหม่ที่ได้จากพืชผลจากเกษตรกรรม ซึ่งจัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) จึงได้รับความสนใจเพื่อนำมาใช้แทนน้ำมันดิบที่จัดว่าเป็นพลังงานสิ้นเปลือง (Non-renewable energy) ที่สามารถหาได้ในประเทศและพืชผลมีแนวโน้มมากพอสำหรับการผลิตในอนาคต และเป็นพลังงานที่มีในท้องถิ่นนั้นๆ น้ำมันพืชและเอทิลแอลกอฮอล์ (แอลกอฮอล์ที่ผลิตมาจากพืช) จึงเป็นตัวเลือกในอันดับแรกๆ ที่ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แทนน้ำมันปิโตรเลียม พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงมีพระราชดำริเกี่ยวกับการพัฒนาเชื้อเพลิงจากวัสดุเกษตร ก่อนจะมีผู้ใดเชื่อว่าน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันสัตว์จะสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ทรงให้มีการทดลองเรื่อยมาจนทำให้ประเทศสามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้ในรถยนต์เพื่อทดแทนการใช้น้ำมันที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม 2548 ได้ทรงพระราชทานพระบรมราโชวาท โดยมีพระราชดำริถึงการให้ภาครัฐเร่งส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน โดยเฉพาะการใช้ไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นพลังงานที่หาได้ในประเทศไทย และยังช่วยสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรอีกด้วย ในรัฐบาลปัจจุบัน ปี 2555 (สมัยนางสาวยิ่งลักษณ์ ชินวัตร) ยังคงดำเนินยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนอย่างต่อเนื่องผลักดันให้พลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ ตามแผนยุทธศาสตร์พลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) กระทรวงพลังงาน ตั้งเป้าหมายสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศ ภายในปี 2565 เพื่อผลักดันให้เกิดการพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นแหล่งพลังงานหลักของประเทศ ลดใช้พลังงานลง 19.7 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบหรือคิดเป็นเงินประหยัดมากกว่า 460,000 ล้านบาทต่อปี (วรรณรัตน์ ชาญนุกูล. 2554: 10-23) โดยไบโอดีเซลได้ถูกจัดเป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมายพลังงานทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วย โดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้จัดทำยุทธศาสตร์แผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มปี พ.ศ. 2551-2555 กำหนดเป้าหมายการปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ใหม่เพิ่มขึ้นอีก 2.5 ล้านไร่ ภายในปี พ.ศ. 2555 เพื่อใช้ผลผลิตน้ำมันปาล์มเพียงพอต่อความต้องการสำหรับเพื่อการบริโภคและอุปโภค

ปาล์มน้ำมัน นับว่าเป็นพืชน้ำมันที่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากมีปริมาณการผลิตและผลผลิตต่อไร่สูงที่สุดในบรรดาพืชน้ำมันเศรษฐกิจที่มีปลูกในประเทศ แหล่งปลูกปาล์มน้ำมันที่สำคัญในประเทศคือภาคใต้ พื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 97 อยู่ในภาคใต้ ร้อยละ 2 อยู่ในภาคตะวันออก อีกร้อยละ 1 อยู่ภาคอื่นๆ ปาล์มน้ำมันสกัดได้จาก 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจากเปลือกผลชั้นนอกและเนื้อผลชั้นนอกเรียกว่าน้ำมันปาล์ม

(Palm oil) และส่วนที่สองจากเนื้อผลชั้นในและเอมบริโอ เรียกว่าน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) (กล้าณรงค์ ศรีรอต; และ คนอื่นๆ. 2546: 25)

การนำน้ำมันพืชมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถทำได้หลายวิธี คือ การนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง การผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล และการนำน้ำมันพืชมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ [เป็นสารที่เกิดจากกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (Fatty acids)] โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous) ในรูปสารละลายกรดหรือเบสหรือตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) อยู่ในรูปของแข็ง หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ ได้ผลผลิต (Yield) เป็นไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งการนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงหรือมีการผสมกับน้ำมันอื่นนั้น พบว่าก่อให้เกิดปัญหากับเครื่องยนต์ ดังนั้นไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจึงเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ และไอเสียมีมลพิษต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล (พิศมัย เจนวินิชปัญจกุล; และ ลลิตา อัตนโถ. 2549: 8-11)

กระบวนการผลิตจะผสมน้ำมันพืชให้ทำปฏิกิริยากับเมทิลแอลกอฮอล์ หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปแล้วการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) จะเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาถูก ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสั้น แต่มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้องใช้พลังงานสูงในการเกิดปฏิกิริยา เกิดสบู่ขึ้นในปฏิกิริยา ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากในการล้างสบู่ออก ทำให้สิ้นเปลืองและเกิดน้ำเสียปริมาณมาก ยุ่งยากในการนำกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้ในผลผลิตไบโอดีเซลมาใช้

การใช้เอนไซม์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งวิธีนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการคือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิต ไม่ต้องผ่านกระบวนการล้างเมื่อทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ ปฏิกิริยามีความจำเพาะสูง แต่มีข้อจำกัดในด้านราคา ความคงตัวของเอนไซม์ ซึ่งการตรึงเอนไซม์ไลเปสก่อนที่จะนำไปใช้เป็นหนทางในการแก้ข้อจำกัดด้านความคงตัวของเอนไซม์ลงได้ สามารถนำเอนไซม์ที่ถูกตรึงกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เพื่อลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล ลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ และลดการขาดดุลการค้า รวมทั้งเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นพลังงานทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลโดยตรงได้บางส่วน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำกลับมาใช้ผลิตไบโอดีเซลซ้ำ และศึกษาคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ความสำคัญของการวิจัย

สามารถนำเอนไซม์ตรึงรูปกลับมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้ซ้ำอีก ลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล เป็นแนวทางสำหรับการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นพลังงานทดแทนบางส่วน เพื่อลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันดีเซลและน้ำมันดิบจากต่างประเทศ และเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร สร้างรายได้ให้กับชุมชน

ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ให้บรรลุผลตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาไว้ดังต่อไปนี้ คือ

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่
   - 1.1 น้ำมันปาล์มที่ใช้คือ น้ำมันปาล์มดิบ
   - 1.2 เมทานอล
   - 1.3 เฮกเซน
   - 1.4 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์
2. เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป
   - 2.1 เอนไซม์ไลเปสอิสระ
   - 2.2 ตัวพยุงคือ มอนต์มอริลโลไนต์
3. การทดลองมี 3 ขั้นตอนคือ

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การนำเอนไซม์ไลเปสอิสระมาตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ เรียกว่า เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป

3.2 การผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณน้ำมันปาล์ม เมทานอล เฮกเซน เอนไซม์ไลเปสอิสระ เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เตรียมในข้อ 3.1 อุณหภูมิ และเวลาสัมผัส เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

3.3 นำเอนไซม์ตรึงรูปจากการผลิตไบโอดีเซลครั้งแรกกลับมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไปตามสภาวะที่เหมาะสมในข้อ 3.2

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรต้น แบ่งเป็นดังนี้

1.1 อัตราส่วน

1.1.1 อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ปริมาณที่ใช้คือ 1:3, 1:4, 1:5 และ 1:6 โมล/โมล

1.2 ลักษณะการใช้เอนไซม์

1.2.1 เอนไซม์ไลเปสอิสระ ปริมาณที่ใช้คือ ร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม

1.2.2 เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป ปริมาณที่ใช้คือ ร้อยละ 70 , 80 , 90 และ 100 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม

1.3 อุณหภูมิ สำหรับการทำปฏิกิริยาคือ 40, 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส

1.4 เวลาสัมผัส สำหรับการทำปฏิกิริยาคือ 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 และ 96 ชั่วโมง

2. ตัวแปรตาม

2.1 คุณภาพของไบโอดีเซล เทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549

2.2 ปริมาณไบโอดีเซล

3. ตัวแปรควบคุม

3.1 เฮกเซน ปริมาณที่ใช้คือ เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน

3.2 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. **การผลิตไบโอดีเซล** หมายถึง การทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์มกับเมทิลแอลกอฮอล์ โดยมีเอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นไบโอดีเซล (สารประกอบเมทิลเอสเทอร์) โดยมีผลพลอยได้คือ กลีเซอรอล

2. **เอนไซม์ไลเปสอิสระ** หมายถึง เอนไซม์ไลเปสที่ผลิตจากยีสต์ สายพันธุ์ *Candida rugosa* ซึ่งยังไม่ผ่านการตรึงรูป ด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพ

3. **มอนต์มอริลโลไนต์** เป็นแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสามารถให้เอนไซม์ไลเปสอิสระเข้าไปยึดเกาะ โดยโครงสร้างพื้นฐานแต่ละหน่วยจะซ้อนกันไม่สนิท มีประจุลบในโครงสร้างมาก มีช่องว่างให้ไอออนบวกบางชนิดแทรกเข้าไปได้ มีการแลกเปลี่ยนกับไอออนของสารอินทรีย์ สามารถดูดยึดไอออนบวกไว้ได้มากทั้งบนผิวภายนอกและในช่องว่าง ใช้สำหรับเป็นตัวพยุง

4. **การตรึงรูปด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพ** หมายถึง วิธีการตรึงโดยนำเอนไซม์ไลเปสอิสระไปจับกับพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งเป็นตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำ ด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุ

5. **เอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์** หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาย่อยสลายน้ำมัน โดยทำให้พันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลน้ำมันแตกออกอย่างสมบูรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล

6. **คุณภาพไบโอดีเซล** หมายถึง คุณภาพของไบโอดีเซลเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 ในที่นี้จะตรวจสอบคุณสมบัติดังนี้

ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ คือ ความบริสุทธิ์แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลในกระบวนการผลิต

ความหนาแน่น คือ น้ำหนักของสารใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร บ่งบอกถึงปริมาณของไบโอดีเซล ยิ่งมีค่ามากแสดงให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย มีความแตกต่างอันเนื่องมาจากชนิดของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันต่างๆ ในน้ำมันพืชหรือสัตว์

ความหนืด คือ ความต้านทานต่อการไหลของไบโอดีเซล ยิ่งมีค่ามากแสดงมีความหนืดสูง ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิต่ำสุดซึ่งเมื่อผ่านเปลวไฟทดสอบแล้วทำให้ไอของน้ำมันเกิดเปลวไฟลุกวาบขึ้น มีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ช้ากว่าน้ำมันดีเซล เพื่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาและการขนถ่าย

ค่าความเป็นกรด คือ ปริมาณน้ำหนักของโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยเป็นมิลลิกรัม (mg KOH) ที่ใช้สะเทินกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน 1 กรัม ปริมาณค่ากรดไขมันอิสระที่มีค่าสูงจะมีค่าความเป็นกรดสูง ก่อให้เกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์

7. **ต้นทุนการผลิต** หมายถึง ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ประกอบด้วยค่าวัตถุดิบน้ำมันปาล์ม และค่าสารเคมีเท่านั้น โดยคิดในหน่วยราคาบาทต่อลิตร

กรอบแนวคิดของการวิจัย

ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดของการวิจัย

สมมติฐานของการวิจัย

ผลผลิตไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักไบโอดีเซล มีคุณภาพเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ โดยศึกษา ค้นคว้า รวบรวม เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ครอบคลุมหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1. ไบโอดีเซล
2. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล
3. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล
4. เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์
5. มาตรฐานของไบโอดีเซล
6. ทฤษฎีการผลิต
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลังงาน (Energy) หมายถึง ความสามารถในการทำงานซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งที่อาจให้งานได้ ได้แก่ พลังงานหมุนเวียนและพลังงานสิ้นเปลือง

ส่วนพลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทน “น้ำมันเชื้อเพลิง” สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า “พลังงานสิ้นเปลือง” ได้แก่ น้ำมัน รวมทั้งหินน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ และพลังงานทดแทนอีกประเภท ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า “พลังงานหมุนเวียน” ได้แก่ ไม้ กระดาษ ฟืน แกลบ กากอ้อย ชีวมวล (แปรเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลว เช่น เอทานอล และไบโอดีเซล) น้ำ แสงอาทิตย์ ลม และคลื่น

1. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลคือ เชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ หรือน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำน้ำมันพืชชนิดต่างๆ มาสกัดเอายางเหนียวและสิ่งสกปรกออก (Degumming) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางเคมี (Transesterification) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจาก Triglycerides เป็น Organic Acid Esters

เรียกว่าไบโอดีเซล และได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ ใช้เป็นวัตถุดิบอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง ฯลฯ (สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. 2550: 18)

ไบโอดีเซลหมายถึง น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการผสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ น้ำมันพืชนั้นสามารถใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลได้โดยตรง หรือถูกย่อยสลาย และเปลี่ยนกรดอิสระเป็นเอสเทอร์ก่อนก็ได้ ในขณะที่ไขมันสัตว์จะต้องถูกย่อยและเปลี่ยนกรดอิสระเป็นเอสเทอร์ก่อนเท่านั้น (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2550: 119)

ไบโอดีเซลหมายถึง เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากเกษตรกรรมโดยผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์

ไบโอดีเซล เป็นสารเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมัน/ไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ การเรียกชื่อสารเอสเทอร์ที่ได้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมื่อใช้เมทานอล จะเรียกสารที่ได้ว่า เมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้เอทานอลในการทำปฏิริยา จะเรียกสารที่ได้ว่า เอทิลเอสเทอร์ อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลเป็นคำรวมที่ใช้เรียกสารเอสเทอร์เหล่านี้ที่ใช้เป็นสารเชื้อเพลิงทดแทนจากพืช ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว หรือใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลก็ได้

ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์นี้ เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ไอเสียมีมลพิษต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล (พิศมัย เจนวินิชปัญจกุล; และ ลลิตา อัตนโถ. 2549: 11)

ไบโอดีเซลคือ น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งซึ่งนำมาใช้ทดแทนดีเซลปิโตรเลียมได้โดยการสังเคราะห์จากน้ำมันพืชหรือไขน้ำมันสัตว์ ด้วยกระบวนการ Transesterification กับแอลกอฮอล์โดยมีสารเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปสารเร่งปฏิกิริยาจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากให้ผลลัพธ์ในรูปสัดส่วนการแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่สูงและใช้เวลาสั้น นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ อีก เช่น กรด, metal hydroxides, carbonates, enzymes และพวก non-ionic bases เช่น amines, amidines เป็นต้น อย่างไรก็ตามสารเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ยกเว้นการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผู้ทำการวิจัยได้ผลเป็นที่น่าพอใจ (ในกรณีที่น้ำมันที่ใช้มีกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูง) เพียงแต่ระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาจะยาวนานกว่าแบบแรกและจะต้องทำปฏิกิริยาที่ความดันสูง (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2547: 60)

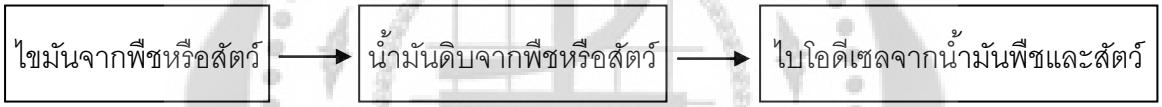
ไบโอดีเซล เป็นน้ำมันพืชเชื้อเพลิงสะอาดที่ผสมด้วยของผสมอย่างน้อย 2 ชนิดคือ น้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันพืช ซึ่งมีการผลิตโดยใช้พืชผลการเกษตรเป็นวัตถุหลัก แล้วผ่านกรรมวิธีทางเคมีจนเป็นเอสเทอร์ (Ester) ซึ่งมีลักษณะของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซล (ส.สายลม. 2544: 85)

ประเภทของไบโอดีเซล

ป่วย อุ่นใจ; และ สยาม ภพลือชัย (2544: 52-54) กล่าวว่า ไบโอดีเซลคือ การนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์หรือแม้แต่น้ำมันที่ใช้แล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล สามารถแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมันที่นำมาใช้ได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. **น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์**

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือน้ำมันพืช (เช่น น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันถั่วลิสง, น้ำมันถั่วเหลือง) หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ (เช่น น้ำมันหมู) ซึ่งสามารถเอามาใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นใดหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันให้เปลืองเวลาและทรัพยากรอีก



ภาพประกอบ 2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือสัตว์

เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ต่างกับดีเซลค่อนข้างมากจึงมีปัญหาการสันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องสะดุด มีผลต่อลูกสูบและวาล์ว มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำลง ทำให้สตาร์ทติดยากในที่อากาศเย็น แต่ก็มีข้อดีคือ ราคาถูก หาได้ง่าย มีค่าความร้อนประมาณร้อยละ 80 ของน้ำมันดีเซล ใช้ได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ แต่ไม่เป็นที่นิยม

มีรายงานในประเทศไทยถึงการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซลดังนี้

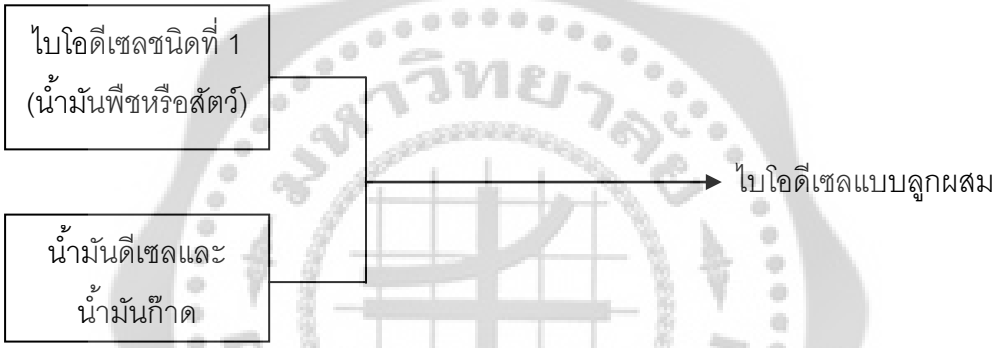
รายงานการวิจัยโดยใช้น้ำมันถั่วลิสงเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ยันมาร์ขนาด 7 แรงม้า โดยไม่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ พบว่าน้ำมันถั่วลิสงมีความหนืดสูง การติดเครื่องยนต์เป็นไปได้ยาก เครื่องเดินสะดุด การสันดาปเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันถั่วลิสงมีเขม่าจับที่ลูกสูบและวาล์วมากกว่าใช้น้ำมันดีเซล (จันทรนาถ พลชำนิ. 2548: 11; อ้างอิงจาก พิศมัย เจนวณิชปัญจกุล; และคนอื่นๆ. 2525)

ในปี พ.ศ. 2543 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงมีพระราชกระแสรับสั่งให้ดำเนินการทดลองนำน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์มาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลของรถยนต์ ในกองงานส่วนพระองค์ จาก

ผลการทดลองพบว่าไม่มีผลกระทบใดๆ ในทางลบกับเครื่องยนต์ดีเซล (คณะกรรมมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545: 19-20)

2. ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เนื่องจากไบโอดีเซลประเภทนี้จะมีการลดปัญหาเรื่องความหนืดไปได้บ้าง แต่จะมีปัญหาเรื่องการอุดตันของเครื่องยนต์คือไส้กรองจะอุดตันเร็วกว่าปกติ คุณสมบัติส่วนมากจะเหมือนกันกับน้ำมันดีเซล เครื่องจะเดินเรียบ ไม่มีปัญหาเครื่องสะดุดเหมือนแบบแรก เครื่องสตาร์ทติดง่าย เหมาะสำหรับการใช้เครื่องยนต์รอบต่ำ หรือเครื่องจักรกลการเกษตร



ภาพประกอบ 3 การผลิตไบโอดีเซลแบบลูกผสม

สำหรับในประเทศไทยการผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลนั้นใช้อัตราส่วนแตกต่างกันไปในแต่ละจังหวัดของประเทศดังนี้

สูตรอำเภอบางคนที จังหวัดสมุทรสงคราม ใช้น้ำมันมะพร้าวดิบ : น้ำมันก๊าด : น้ำมันดีเซล ในอัตราส่วน 20 : 1 : 4

สูตรอำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ใช้น้ำมันมะพร้าวดิบ : น้ำมันก๊าด ในอัตราส่วน 20 : 1

สูตรจังหวัดชุมพร ใช้น้ำมันปาล์มดิบ : น้ำมันก๊าด : น้ำมันดีเซล ในอัตราส่วน 60 : 7 : 40

3. ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์มาผ่านกระบวนการทางเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์ (เมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์) กับ กรด ด่างหรือเอนไซม์ ที่เรียกว่า Transesterification process เพื่อเปลี่ยนรูปของน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ (Ester) ซึ่งเรียกว่า เมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ ขึ้นกับแอลกอฮอล์ที่ใช้ ซึ่งเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

นอกจากนี้ยังได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำมาทำสบู่ และอุตสาหกรรมต่อเนื่องประเภทเครื่องสำอาง ไบโอดีเซลประเภทนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ข้อดีคือ ค่าซีเทน (ค่าดัชนีการจุดติดไฟ) สูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือ จุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี การสันดาปสมบูรณ์ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อย ความหนืดคงที่ นอกจากนี้ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้ยังสามารถใช้กับเครื่องยนต์รอบสูง ข้อเสียคือมีราคาแพง ต้นทุนการผลิตสูงกว่าไบโอดีเซลแบบอื่นๆ เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น

ภาพประกอบ 4 การผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

คุณสมบัติของไบโอดีเซล (เทียบกับน้ำมันดีเซล) ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล (พิศมัย เจนวินิชปัญจกุล; และ ลลิตา อัตนโถ. 2549: 34-40)

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมี มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบ และบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ ดังต่อไปนี้

1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้วกำมะถันในน้ำมันดีเซลจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถัน ตามลำดับ เกิดเป็นมลพิษทางอากาศเมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษเหล่านี้เกิดเป็นฝนกรดได้

2. น้ำมันดีเซล ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล และมีองค์ประกอบของสาร Aromatic compound ถึงร้อยละ 20-40 ขณะที่ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบประเภท Aromatic compound แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10-12 ทำให้เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงไอเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และมีควันดำต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล

3. ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ช้ากว่าน้ำมันดีเซล

4. น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียรตัว เกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล และมีระยะการเก็บรักษาหลังการผลิตสั้นกว่าน้ำมันดีเซล

5. ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี

จุดอ่อนของไบโอดีเซล (สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. 2550: 20-21)

ข้อเสียในด้านเทคนิคที่มักจะเกิดขึ้นเสมอในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซล คือ

1. หากใช้ไบโอดีเซล ร้อยละ 100 (B100) จะทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ทำจากยางธรรมชาติเปื่อยยุ่ยได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนชิ้นส่วนท่อยางต่างๆ ที่น้ำมันไหลผ่านให้เป็นยางสังเคราะห์จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้

2. สำหรับการใช้ไบโอดีเซลแบบผสมกับน้ำมันดีเซล เช่น น้ำมันดีเซล ร้อยละ 95 ไบโอดีเซล ร้อยละ 5 (B5) ที่จำหน่ายโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปั๊ม ปตท.) ไม่ต้องเปลี่ยนท่อยางใดๆ เพียงแต่เปลี่ยนไส้กรอง (กรองโซล่า) หลังจากใช้ไบโอดีเซลในครั้งแรกไปได้ระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เพราะไบโอดีเซลจะไปชะล้างคราบเขม่า และคราบสกปรกอื่นๆ ที่ติดค้างอยู่ในระบบเครื่องยนต์ หลังจากนั้นสามารถใช้ไปตามปกติเหมือนเดิม

โดยทั่วไปการใช้ไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมผสมเป็นสูตรต่าง ๆ

B2 (ไบโอดีเซล ร้อยละ 2 : ดีเซล ร้อยละ 98) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา และบังคับใช้ทั้งมลรัฐ ในปี พ.ศ. 2548

B5 (ไบโอดีเซล ร้อยละ 5 : ดีเซล ร้อยละ 95) มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5

B20 (ไบโอดีเซล ร้อยละ 20 : ดีเซล ร้อยละ 80) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ (Alternative Motor Fuels Act : AMFA 1988) ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะรถยานยนต์ในพื้นที่ที่ต้องคำนึงถึงมลพิษเป็นพิเศษ เช่น รถรับส่งนักเรียน รถประจำทาง เรือ หรือเครื่องจักรกลที่ใช้ในเหมืองแร่ ทั้งนี้ได้การรับรองจากบริษัทผู้ผลิตระบบหัวฉีดและเครื่องยนต์

B40 (ไบโอดีเซล ร้อยละ 40 : ดีเซล ร้อยละ 60) เป็นสูตรที่ใช้ในรถขนส่งมวลชนในประเทศฝรั่งเศส ทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ

B100 (ไบโอดีเซล ร้อยละ 100) เป็นน้ำมันไบโอดีเซล ร้อยละ 100 ที่ใช้ในประเทศเยอรมันและออสเตรียโดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

ตาราง 1 ปริมาณมลพิษในไอเสียที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไบโอดีเซล ร้อยละ 100 (B100) และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล ร้อยละ 20 (B20) เทียบกับน้ำมันดีเซล

มลพิษในไอเสีย	ไบโอดีเซล 100 % (B100)	น้ำมันดีเซลที่มีไบโอดีเซล 20 % (B20)
1. แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	ลดลง ร้อยละ 42.3	ลดลง ร้อยละ 12.6
2. ไฮโดรคาร์บอน	ลดลง ร้อยละ 56.3	ลดลง ร้อยละ 11.0
3. ฝุ่นละออง	ลดลง ร้อยละ 55.4	ลดลง ร้อยละ 18.0
4. แก๊สไนโตรเจนออกไซด์	เพิ่มขึ้น ร้อยละ 5.8	เพิ่มขึ้น ร้อยละ 1.2
5. สารก่อมะเร็ง	ลดลง ร้อยละ 80-90	ลดลง ร้อยละ 20.0

ที่มา: คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. (2545). *พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล*. หน้า 30.

การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย

ในปี พ.ศ. 2528 ได้มีแนวคิดริเริ่มในการนำน้ำมันพืชมาใช้ในเครื่องยนต์ โดยพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงมีพระราชดำริให้ทางมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กที่สหกรณ์นิคมอ่าวลึก จังหวัดกระบี่ และทรงพระกรุณาโปรดเกล้า ฯ ให้สร้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ขนาดเล็กกำลังการผลิตวันละ 110 ลิตร ที่ศูนย์การศึกษาการพัฒนาพิกุลทอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดนราธิวาส จากนั้นได้ทรงมีพระราชดำริ ให้ทดลองนำน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์มาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเริ่มตั้งแต่เดือนกันยายน พ.ศ. 2543 โดยใช้รถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลของกองงานส่วนพระองค์ ที่วังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จากผลการทดลองพบว่า การใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์กับเครื่องยนต์ดีเซลไม่มีผลกระทบใดๆ ในทางลบ และสามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยไม่ต้องผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ หรืออาจใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน น้ำมันปาล์ม : น้ำมันดีเซล ตั้งแต่ร้อยละ 0.01 จนถึง 99.99 ก็ได้เช่นกัน

การใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ทำให้เพิ่มกำลังแรงบิดให้กับเครื่องยนต์ ลดมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ เพิ่มการหล่อลื่น ทำให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานได้นานประหยัดเงินตราในการนำเข้าน้ำมันดีเซลได้บางส่วน นอกจากนี้ยังเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถปลูกทดแทนได้

จากความสำเร็จดังกล่าว พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว จึงทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ ฯพณฯ นายอำพล เสนาณรงค์ องคมนตรี เป็นผู้แทนพระองค์ยื่นจดสิทธิบัตร ณ กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์ ในพระปรมาภิไธยของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เมื่อวันที่ 9 เมษายน 2544 ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์ คือ “การใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล” สิทธิบัตร เลขที่ 10764 และเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2547 ทางภาครัฐโดยโรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง และกรมอู่ทหารเรือ กองทัพเรือ ได้ร่วมมือกับภาคเอกชน โดยกลุ่มบริษัทแสงโสม และบริษัทราชาไบโอดีเซล ได้ร่วมมือกันก่อสร้างอาคารโรงงานและเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซล ภายในโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ น้ำมันพืชใช้แล้วจากห้องเครื่อง สวนจิตรลดา และเอทานอลที่ผลิตไบโอดีเซลในโครงการส่วนพระองค์ พร้อมทดสอบการใช้งานกับรถยนต์ในโครงการส่วนพระองค์ (วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน; และ สุจิตรา พรหมเชื้อ. 2548: 29-30)

ในปัจจุบัน บริษัทที่ดำเนินการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ คือกลุ่มนักธุรกิจปิโตรเลียม ได้แก่ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) และบริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

ส่วนไบโอดีเซลชุมชน มีการดำเนินการตั้งแต่ปี 2548 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน คัดเลือกชุมชนที่มีศักยภาพทั้งในด้านวัตถุดิบและบุคลากร เมื่อคัดเลือกได้แล้วก็จะสนับสนุนระบบผลิตไบโอดีเซลขนาด 100 ลิตรต่อวัน รวมทั้งการอบรมให้ความรู้ด้านเทคนิคการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (BIODIESEL หลากหลายปัจจัย ไบโอดีเซล พลังงานทางเลือก. 2549: 78-79)

ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2550: 123-125)

1. ทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ในปี พ.ศ. 2547 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งสิ้น 55,589 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นมูลค่ามากกว่าสี่แสนล้านบาท โดยเฉพาะน้ำมันดิบที่นำมากลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปมีปริมาณนำเข้าถึงร้อยละ 74 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในปี พ.ศ. 2547 มีประมาณ 55 ล้านลิตร/วัน หากกำหนดให้ราคาน้ำมันดีเซลมีราคาเฉลี่ยประมาณ 16 บาท/ลิตร พบว่าจะต้องจ่ายค่าน้ำมันถึง 880 ล้านบาท/วัน หรือ 321,200 ล้านบาท/ปี นับเป็นเม็ดเงินจำนวนมหาศาลที่ต้องจ่ายไปและทำให้ดุลการค้าของประเทศลดลง เมื่อรัฐบาลได้ประกาศนโยบายเกี่ยวกับการใช้พลังงานทดแทน

โดยได้ตั้งเป้าหมายให้ในปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยจะสามารถผลิตเชื้อเพลิงเป็นไบโอดีเซล บี 10 (B10, น้ำมันดีเซลร้อยละ 90 ผสมกับเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละ 10) จำนวน 85 ล้านลิตร/วัน (น้ำมันดีเซล 76.5 ล้านลิตรผสมกับเมทิลเอสเทอร์ 8.5 ล้านลิตร) หากเป็นไปตามที่คาดการณ์ได้จะสามารถลดการนำเข้าน้ำมันดิบ คิดเป็นมูลค่าประมาณ 62,050 ล้านบาท/ปี ได้

2. ลดมลภาวะ มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ต่ำมากและย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ

3. ช่วยพยุงราคาผลิตผลการเกษตร ในระยะสั้นไบโอดีเซลจะช่วยกระตุ้นราคาพืชน้ำมันให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เกษตรกรจะได้รับผลประโยชน์ในทันที และจะมีส่วนผลักดันให้เศรษฐกิจของชาติฟื้นตัวเร็วขึ้น ถ้าสามารถปลูกพืชที่ผลิตเป็นทั้งอาหาร น้ำมัน และแอลกอฮอล์ การนำมาผลิต ไบโอดีเซลหรือไบโอเบนซิน จะช่วยผลักดันให้มีแหล่งตลาดขนาดใหญ่สำหรับผลิตผลทางการเกษตรดังกล่าวภายในประเทศ ซึ่งจะก่อให้เกิดเศรษฐกิจที่ดี มีความสำคัญยิ่งกับเกษตรกรที่เป็นคนส่วนใหญ่ของประเทศ มีเสถียรภาพ และไม่ผูกพันกับความผันแปรทางด้านพลังงานของโลก

4. สร้างความมั่นคงทางภาคเกษตรกรรมพืชน้ำมันและอุตสาหกรรมการเกษตรในระยะยาว เมื่อมีตลาดเชื้อเพลิงรองรับที่ใหญ่มหาศาลถึง 15,300 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2544 และอาจขยายถึง 30,000 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2563 ภาคเกษตรกรรมที่เกี่ยวข้องย่อมสามารถวางแผนในการผลิตและการขยายตัวได้อย่างมั่นคง อีกทั้งเป็นตลาดภายในประเทศ รัฐบาลสามารถกำหนดราคาและแผนการในทุกด้านได้ล่วงหน้า และสามารถเลิกพึ่งกลไกตลาดของต่างประเทศได้ การประหยัดเงินตราต่างประเทศเป็นเงินปีละ 100,000 ล้านบาทเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่ง แต่การผลักดันให้เกิดธุรกิจภาคเกษตรกรรมที่มีเสถียรภาพในระดับปีละหลายแสนล้านบาท จะยิ่งมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจอีกหลายเท่า ดังนั้นรากฐานที่จะเกิดจากอุตสาหกรรมไบโอดีเซล จึงมีความสำคัญยิ่งต่อเศรษฐกิจโดยรวม

5. สร้างความมั่นคงแก่ประเทศชาติ น้ำมันดีเซลและเบนซินจะหมดจากโลกนี้ภายใน 30 ปีข้างหน้าอย่างแน่นอนหากไม่หาทางลดการใช้ลง โดยมีพลังงานชีวภาพหรือพลังงานอื่นมาเสริมและทดแทนการใช้ในปัจจุบัน อีกทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมจะแพงขึ้น เพราะปริมาณสำรองลดลง ที่สำคัญยิ่งกว่านั้นเชื้อเพลิงชีวภาพจะเป็นเชื้อเพลิงที่สร้างใหม่ได้ทุกปีโดยไม่ต้องพึ่งพาความอยู่รอดจากต่างประเทศ ไบโอดีเซลจึงเป็นพลังงานชีวภาพที่ไม่ใช่แต่มีผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของชาติเท่านั้นหากแต่มีผลต่อความมั่นคงของชาติทั้งภาคเศรษฐกิจและยังรวมถึงการทหารด้วย

6. ทำให้เกิดการส่งเสริมการปลูกป่าเศรษฐกิจเพื่อฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม พื้นที่ในการปลูกพืชไร่ เช่น มันสำปะหลัง และอ้อย สามารถจะเปลี่ยนมาปลูกปาล์มน้ำมัน มะพร้าว หรือพืชน้ำมันยืนต้นอื่น ถ้ามีความเหมาะสมกว่า พื้นที่ป่าเศรษฐกิจจะถูกสร้างขึ้นหลายสิบล้านไร่ในทุกภาค ความอยู่รอดของชาติซึ่งต้องพึ่งพาป่าไม้ช่วยสร้างฝน จะเริ่มดีขึ้นกว่าในปัจจุบัน สภาพแวดล้อมโดยรวมของ

ชาติจะได้รับการปรับปรุงอย่างจริงจังจากอุตสาหกรรมไบโอดีเซลโดยปริยาย การปลูกป่าที่พยายามสร้างกันมาซึ่งให้ผลตอบแทนสูงกว่าพืชไร่อื่น อีกทั้งจะมีเสถียรภาพในเรื่องราคาและการประกันราคาจะทำได้ดีกว่าอ้อยและมันสำปะหลังหรือยางพารา ซึ่งถูกกำหนดโดยตลาดต่างชาติ และถ้ารัฐบาลจะส่งเสริมป่าเศรษฐกิจเพื่อปลูกปาล์มน้ำมัน มะพร้าว หรือพืชน้ำมันยืนต้นอื่น พร้อมทั้งสนับสนุนเงินและสาธารณูปโภค ป่าเศรษฐกิจก็อาจจะสามารถเกิดในพื้นที่เสื่อมโทรมได้ด้วยดังเช่น ประเทศอิสราเอลที่ปลูกป่าในทะเลทราย

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **ไบโอดีเซล** เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันที่ใช้แล้ว อาจเกิดจากการผสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ หรือโดยการสังเคราะห์จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันที่ใช้แล้ว นำมาผ่านกระบวนการทางเคมี (Transesterification) กับแอลกอฮอล์ โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เบส เอนไซม์ หรือโลหะ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์นี้ สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ไอเสียมีมลพิษต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล โดยรัฐบาลกำหนดเป็นนโยบายยุทธศาสตร์ และการดำเนินงานไบโอดีเซลของประเทศไทย ทำให้ในปัจจุบันมีการดำเนินการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ และไบโอดีเซลชุมชน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมภายในประเทศและชุมชนท้องถิ่น

2. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การนำน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล วิธีการทั่วๆ ไปที่ปัจจุบันใช้ในการผลิตไบโอดีเซลทั้งที่เป็นแบบยากและง่าย ในแบบที่ง่ายจะได้มาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันหรือการผสมโดยตรง สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ (ไกรพัฒน์ จีนขจร. 2550: 40-44)

1. การใช้โดยตรงและการผสม (Direct use and blending)
2. ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)
3. กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermalcracking or Pyrolysis)
4. กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการย่อยๆ คือ
    4.1 เอสเทอริฟิเคชัน (Esterification)
    4.2 สปอนิฟิเคชัน (Saponification)

1. **การใช้โดยตรงและการผสม** (Direct use and blending)

การใช้น้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยตรงได้ทำมานานแล้วนับตั้งแต่เครื่องยนต์ดีเซลได้ถูกคิดค้นขึ้น แต่หลังจากนั้นน้ำมันดีเซลจากการกลั่นได้เข้ามาแทนที่ เนื่องจากคุณสมบัติทางการเผาไหม้ที่ดีกว่าและราคาที่ถูกกว่า ทำให้น้ำมันพืชไม่ได้รับความนิยมในการทำเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง การใช้งานประเภทนี้เป็นลักษณะการใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยตรงไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติก่อนแต่อย่างใดสามารถนำมาเติมในเครื่องยนต์สูบเดียว ความเร็วรอบต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรม ปัญหาหลักของการใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันดีเซลทั้งแบบผสมและโดยตรงนั้นส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนในอากาศกับพันธะคู่ในน้ำมันพืช ส่งผลให้ความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น และเกิดยางเหนียวของน้ำมัน การนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงควรใช้ชนิดที่องค์ประกอบของกรดไขมันมีพันธะคู่ที่ต่ำ

2. **ไมโครอิมัลชัน** (Microemulsion)

เนื่องจากการใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์ดีเซลทำให้เกิดปัญหาเรื่องความหนืดของน้ำมันพืชที่มีค่าสูง ดังนั้น แนวทางการแก้ไขปัญหานี้คือ การผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นของผสมประเภทคอลลอยด์ โดยโมเลกุลของแอลกอฮอล์จะกระจายในขนาดที่เล็กมากประมาณ 1-150 นาโนเมตรในวัฏภาคของน้ำมัน ส่งผลให้ความหนืดของน้ำมันลดลง และยังเพิ่มสมบัติของการเกิดละอองขณะที่ฉีดเข้าไปในกระบอกสูบอีกด้วย ต้องมีสารช่วยลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิดมีประจุและไม่มีประจุ เพื่อทำให้เกิดความคงสภาพ วิธีการทำไมโครอิมัลชันนี้ช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับความหนืดโดยการใช้สารละลาย เช่น แอลกอฮอล์ คุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทำไมโครอิมัลชันจะคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล แต่พบปัญหาเกี่ยวกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

3. **กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรลิซิส** (Thermalcracking or Pyrolysis)

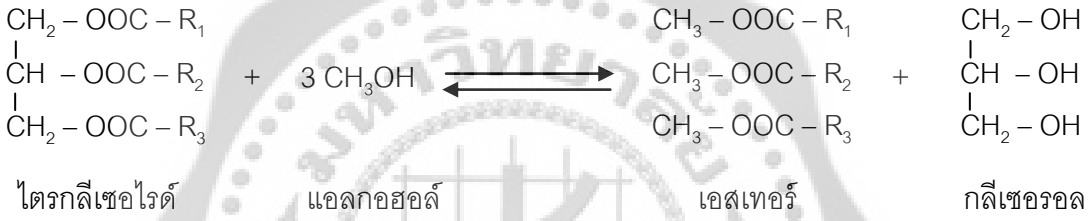
กระบวนการไพโรไลซิสคือ กระบวนการเปลี่ยนสสารจากสารหนึ่งไปเป็นสารอีกตัวหนึ่งโดยวิธีการทางความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 500-850 องศาเซลเซียส โดยบางครั้งอาจมีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย การให้ความร้อนนี้จะไม่มีอากาศหรือออกซิเจนอยู่ด้วย โดยความร้อนจะทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลใหญ่ๆ ย่อยสลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง วัตถุดิบที่นำมาทำปฏิกิริยาไพโรลิซิสเพื่อให้ได้ไบโอดีเซล ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันจากธรรมชาติ เป็นต้น ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าดัชนีซีเทนและค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลทั่วไป แต่มีจุดไหลเทและค่าความหนืดที่มากกว่า แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดคือ อุปกรณ์มีราคาสูง และเมื่อผ่านกระบวนการไพโรลิซิสจะทำให้ออกซิเจนถูกกำจัดออกไป ทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม นอกจากนี้กระบวนการนี้มักจะเป็นการผลิตเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนแก๊สโซลีนมากกว่าเกิดไบโอดีเซล แต่ปริมาณที่ได้มีจำนวนน้อย

4. กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืช กับแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนรูปสารประกอบเป็นสารประกอบเอสเทอร์ โดยมีผลพลอยได้คือ กลีเซอรอล ปฏิกิริยาเป็นไปดังสมการข้างล่าง ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ และการเติมแอลกอฮอล์มากเกินพอ มักจะใช้เพื่อเป็นการบังคับปฏิกิริยาให้เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนโดยโมลของปฏิกิริยาเป็นอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน คือ 3 : 1 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งสารละลายกรด สารละลายเบส และเอนไซม์ไลเปส

ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ส่วนใหญ่จะใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้นที่สุด และเป็นของเหลวที่มีขั้วสูง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากที่สุด

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์



ภาพประกอบ 5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์

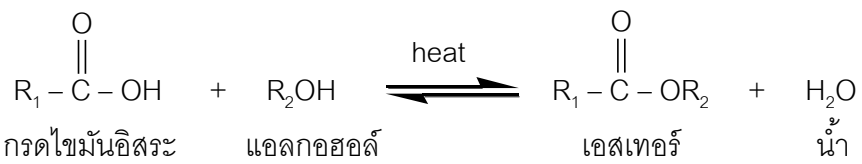
การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สามารถเพิ่มอัตราเร็วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดดังนี้ (ปวีณา อร่ามรัตนา. 2548: 14-15)

1. กรด
2. เบส
3. เอนไซม์

4.1 เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification)

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน เกิดจากสารตั้งต้นคือ กรดไขมันอิสระและแอลกอฮอล์ ได้สารผลิตภัณฑ์คือ เอสเทอร์ ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้โดยเอนไซม์ไลเปส หรือใช้กรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระ

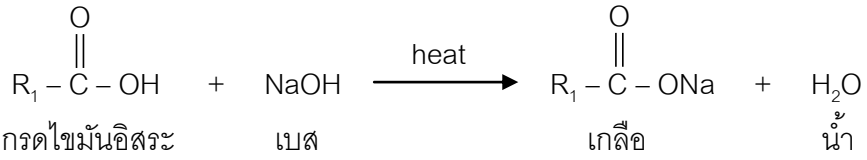


ภาพประกอบ 6 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระ

4.2 **สปอนิฟิเคชัน** (Saponification)

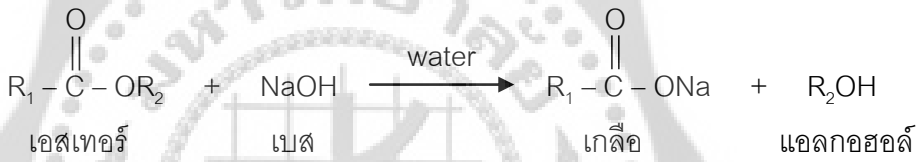
ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สร้างสบู่ขึ้น สามารถเกิดได้จากสารตั้งต้นคือ กรดไขมันอิสระกับสารละลายเบส โดยมีความร้อนในปฏิกิริยา หรือเอสเทอร์กับสารละลายเบสโดยมีน้ำร่วมในปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระโดยความร้อน



ภาพประกอบ 7 ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระโดยความร้อน

ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันจากเอสเทอร์ในปฏิกิริยาที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

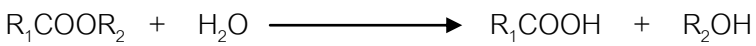


ภาพประกอบ 8 ปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันจากเอสเทอร์ในปฏิกิริยาที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

จากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้สารละลายเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีข้อจำกัดในการทำปฏิกิริยา คือไม่สามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลได้ แต่ทำให้เกิดสบู่ขึ้นซึ่งเป็นสารที่ไม่ต้องการ และทำให้ต้องกำจัดสบู่เหล่านั้นออกด้วย

การเกิดปฏิกิริยาโดยมีเอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถจำแนกได้เป็น 3 แบบ คือปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) (จันทรนาถ พลชำนิ. 2548: 19-20; อ้างอิงจาก Cambou และคณะ: 1984; Langrand และคณะ: 1986)

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส



ภาพประกอบ 9 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสเป็นปฏิกิริยาระหว่างเอสเทอร์กับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปของไลเปส ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผลิตกรดไขมันอิสระได้

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification)

$$R_1COOH + R_2OH \longrightarrow R_1COOR_2 + H_2O$$

ภาพประกอบ 10 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

เป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์กับน้ำ โดยเอสเทอร์ที่ได้สามารถนำไปใช้ได้หลายชนิด เช่น เป็นสารให้กลิ่นในผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง ยา และเชื้อเพลิง แต่การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของไฮโดรลิซิสนั้น จะเกิดขึ้นในตัวกลางที่ไม่ใช่น้ำ แต่ต้องมีน้ำในปริมาณเล็กน้อยเพียงพอที่จะรักษาโครงรูปของเอนไซม์ไว้

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

$$R_1COOR_2 + R_3OH \longrightarrow R_1COOR_3 + R_2OH$$

ภาพประกอบ 11 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการเคลื่อนย้ายหมู่อัลคิล (Alkyl group) ของสารประกอบเอสเทอร์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างเอสเทอร์กับกรดไขมันอิสระ (Acidolysis) เอสเทอร์กับแอลกอฮอล์ (Alcoholysis) เอสเทอร์กับเอสเทอร์ (Interesterification) หรือเอสเทอร์กับกรดไขมัน (Aminolysis) แล้วแต่ชนิดของสารตั้งต้น

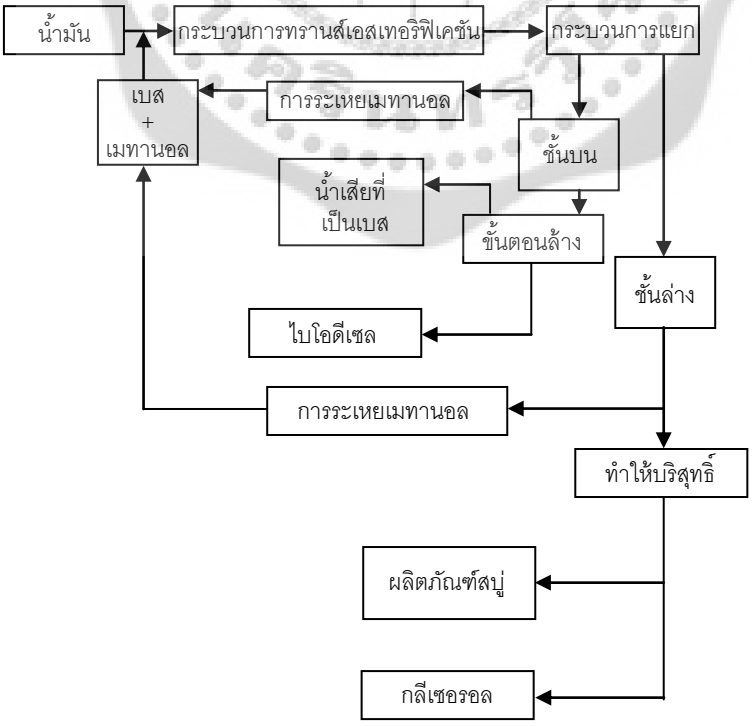
การผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมี โดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีข้อจำกัดดังนี้ มีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และมีความยุ่งยากในการแยกกลีเซอรอล ปัจจุบันมีการศึกษาโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการคือ ปฏิกิริยาไม่รุนแรง สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยามีความจำเพาะ ง่ายต่อการแยกกลีเซอรอล ไม่มีกระบวนการล้างที่ยุ่งยาก แต่การผลิตโดยใช้เอนไซม์ไลเปสต้องใช้ต้นทุนสูง

ตาราง 2 เปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสกับเอนไซม์ในการผลิตไบโอดีเซล

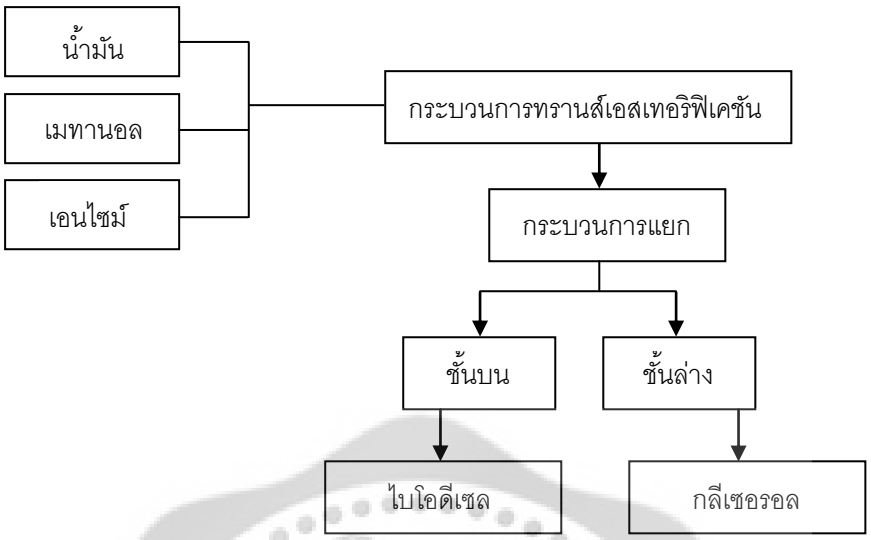
	ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส	ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	60-70 องศาเซลเซียส	30-40 องศาเซลเซียส
ปริมาณกรดไขมันอิสระในสารตั้งต้น	ทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันได้สบู่	ได้อัลคิลเอสเทอร์
ปริมาณน้ำในปฏิกิริยา	มีผลมาก	มีผลเล็กน้อย
ปริมาณอัลคิลเอสเทอร์ที่ได้	ปกติ	สูง
การแยกกลีเซอรอลออกจากปฏิกิริยา	ทำได้ยาก	ทำได้ง่าย
กระบวนการทำอัลคิลเอสเทอร์ให้บริสุทธิ์	ต้องล้างผลิตภัณฑ์หลายครั้ง	ไม่ต้องล้างผลิตภัณฑ์
ราคาของตัวเร่งปฏิกิริยา	ถูก	ค่อนข้างแพง

ที่มา: Hideki Fukuda ; Akihiko Kondo & Hideo Noda. (2001, September). Biodiesel Fuel Product by Transesterification of Oils. *Bioscience and Bioengineering*. 5(92): 408.

(ก) กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



(ข) กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 12 แผนผังการผลิตไบโอดีเซล
(ก) โดยใช้เบส และ (ข) โดยใช้เอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Srivathsan Vembanur Ranganathan ; Srinivasan Lakshmi Narasimhan & Karuppan Muthukumar. (2008). An overview of enzymatic product of biodiesel. *Bioresource Technology*. (99): 3977.

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (ประกาศิต คุณพระศิลา. 2550: 21)

1. น้ำหรือความชื้น

การที่มีความชื้นในไขมันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของไขมันหรือน้ำมัน โดยน้ำจะเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่ และสบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่ได้ ทำให้สารละลายผสมทั้ง 2 มีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น วิธีป้องกันคือแอลกอฮอล์ ไขมันหรือน้ำมันควรมีน้ำหรือความชื้นปนเปื้อนน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย สำหรับที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์ ทั้งในสภาวะที่มีและปราศจากน้ำ

2. ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งกรด เบส และเอนไซม์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เนื่องจากเบสมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง และให้ผลดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรด

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นเบส ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สอดคล้องกับแอลกอฮอล์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดพบว่ามีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ภาชนะที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อไขมันสูง และใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา ส่วนกรณีการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีข้อดี คือสามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ การแยกกลีเซอรอลออกจากปฏิกิริยาทำได้ยาก เสียค่าใช้จ่ายในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสออกจากผลิตภัณฑ์ ต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาได้อีกด้วย

3. เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นในระยะแรกของปฏิกิริยา และจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมจึงจำเป็นในการผลิตไบโอดีเซล

4. อุณหภูมิ

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างที่ทำปฏิกิริยา ถ้าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาต่ำลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง อีกทั้งยังมีผลต่อการทำงานเอนไซม์ อุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้เอนไซม์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำ เช่นเดียวกันอุณหภูมิที่ใช้สูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเอนไซม์อาจเสียสภาพน้ำที่จำเป็นไป (ดุษฎี รัตนพระ. 2549: 31) การศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

5. ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้กล่าวคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำหรือสูงเกินไป จะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ต่ำ ดังนั้นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น และไม่เกิดการสิ้นเปลืองโดยไม่จำเป็น นอกจากนี้ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงเกินไปจะทำให้ตัวเร่งที่เกินไปทำปฏิกิริยากับน้ำมัน กรณีที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันหรือการเกิดสบู่

6. อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อปริมาณของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น โดยตามทฤษฎีอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันจะเท่ากับ 3 : 1 ในทางปฏิบัติจะต้องให้ปริมาณแอลกอฮอล์มากกว่าตามทฤษฎี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

7. ตัวทำละลายอินทรีย์

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันและเมทานอล โดยมีเอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เอนไซม์ไลเปสอาจสูญเสียกิจกรรมได้หากสัมผัสโดยตรงกับเมทานอล สามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้ดี ลดการสัมผัสระหว่างเอนไซม์ไลเปสกับเมทานอลได้ นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในปฏิกิริยาของไขมันและน้ำมันมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้น้ำ เพราะไขมันและน้ำมันสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี ในขณะที่เอนไซม์ไม่ละลายซึ่งจะช่วยให้สามารถแยกเอนไซม์ออกจากผลผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ตัวทำละลายจะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือช่วยให้เกิดการสังเคราะห์เอสเทอร์จากกรดคาร์บอกซิลิกกับแอลกอฮอล์หรือเปปไทด์จากกรดอะมิโน (ดุษฎี รัตนพระ. 2549: 36)

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **กระบวนการผลิตไบโอดีเซล** แบบที่ง่ายจะได้มาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนรูปสารประกอบเป็นสารประกอบเอสเทอร์ มีผลพลอยได้เป็นกลีเซอรอล โดยใช้สารตั้งต้นของอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันคือ 3 : 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้อาจเป็นสารละลายกรด สารละลายเบส หรือเอนไซม์ไลเปส และเพื่อเป็นการบังคับปฏิกิริยาให้เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ คือสารประกอบเอสเทอร์ จะต้องเติมแอลกอฮอล์มากเกินพอ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ แล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ อีก ได้แก่ น้ำ เวลา อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพปริมาณของไบโอดีเซล (สารประกอบเอสเทอร์) ที่เกิดขึ้นได้

3. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

น้ำมันพืช

พืชพลังงานหมายถึง พืชที่ให้พลังงานที่สามารถนำมาแปรรูป และใช้เป็นแหล่งของพลังงาน ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ สารที่นิยมใช้เป็นแหล่งของพลังงานจากพืชเหล่านี้ ได้แก่ แอลกอฮอล์ ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินเกิดเป็นแก๊สโซฮอล์ สำหรับใช้กับเครื่องยนต์เบนซิน และน้ำมันพืชซึ่งเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลเกิดเป็นไบโอดีเซล สำหรับใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล (ณรงค์ โฉมเฉลา. 2548: 2)

ประเทศไทยทำการเพาะปลูกพืชน้ำมัน 7 ชนิด คือ ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา ทานตะวัน และละหุ่ง ในจำนวนพืช 7 ชนิดนี้ ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีรายงานปริมาณผลผลิตในแต่ละปีสูงที่สุด ในปี 2552 ประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 9.2 ล้านตัน รองลงมา

ได้แก่ มะพร้าว ซึ่งมีผลผลิตประมาณ 1.3 ล้านตัน สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้รายงานปริมาณผลผลิตของพืชน้ำมัน 7 ชนิด ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ปริมาณการผลผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย (หน่วย : พันตัน)

ปี พ.ศ.	ปาล์มน้ำมัน	มะพร้าว	ถั่วเหลือง	ถั่วลิสง	งา	ทานตะวัน	ละหุ่ง
2548	5,003	1,940	226	67	42	38	10
2549	6,715	1,815	215	65	41	24	10
2550	6,390	1,722	201	53	42	23	10
2551	9,271	1,484	187	53	44	-	11
2552	8,162	1,381	190	51	46	-	11

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2554). *สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2552.* สืบค้นเมื่อ 17 กันยายน 2554, จาก www.oae.go.th/download/download_journal/yearbook2552.pdf

นอกเหนือจากพืชน้ำมัน 7 ชนิดที่เกษตรกรทำการเพาะปลูกแล้ว ยังมีแหล่งน้ำมันอื่นๆ เช่น สบู่ดำ น้ำมันสัตว์ น้ำมันพืชใช้แล้ว และน้ำมันสัตว์ใช้แล้ว แหล่งเหล่านี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งสิ้น

น้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบสามารถสกัดจากพืชน้ำมันได้ทุกชนิด การพิจารณาเลือกพืชชนิดใดมาใช้ ต้องคำนึงถึงปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันในพืชชนิดนั้น และความเหมาะสมของปริมาณการเพาะปลูกในพื้นที่นั้นๆ ด้วย (คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545: 89)

ปาล์มน้ำมัน (พืชพรรณ/กองบรรณาธิการ. 2551: 45-50) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีถิ่นกำเนิดในบริเวณแอฟริกาตะวันตก ประมาณ ปี พ.ศ. 2391 ชาวโปรตุเกสได้นำพันธุ์ปาล์มมาทดลองปลูกที่สวนพฤกษศาสตร์ เมืองโบเกอร์ ประเทศอินโดนีเซีย จากนั้นได้แพร่ขยายพันธุ์มายังเกาะสุมาตราและคาบสมุทรมาเลย์

ส่วนในประเทศไทยตั้งแต่ พ.ศ. 2472 เป็นต้นมามีผู้นำมาทดลองปลูกที่สถานีทดลองยางคอหงส์ จังหวัดสงขลา และสถานีกสิกรรมพลิ้ว จังหวัดจันทบุรี

การพัฒนาปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ระยะ คือระยะแรกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2472-2525 หรือระยะเวลาประมาณ 50 ปี ซึ่งเป็นระยะของการเริ่มต้น มีการขยายพื้นที่ปลูกค่อนข้างช้า

ระยะที่สอง คือตั้งแต่ พ.ศ.2525-ปัจจุบัน เป็นระยะที่มีการขยายพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะตั้งแต่ พ.ศ. 2547 เป็นต้นมา รัฐบาลมีนโยบายการขยายพื้นปลูกปาล์มน้ำมันจากพื้นที่ในเขตภาคใต้และภาคตะวันออกสู่พื้นที่ในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากเป็นระยะที่ประเทศไทยประสบปัญหาวิกฤตราคาน้ำมันแพงทำให้มีความต้องการนำน้ำมันปาล์มมาแปรรูปเป็นพลังงานทดแทน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันสูง มีต้นทุนการผลิตและราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแพร่หลายทั้งในสินค้าอุปโภคและบริโภค ซึ่งปาล์มน้ำมันเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น จัดอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศบริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุดคือ จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและตรัง โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 และรองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และ 15.89 ของพื้นที่ปลูกทั้งประเทศตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผลตอบแทนการปลูกปาล์มน้ำมันดีกว่าการปลูกพืชชนิดอื่น เช่น ยางพาราและการทำนาข้าว จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกประกอบกับมีโครงการเปลี่ยนพื้นที่ปลูกปาล์มทั่วประเทศ ในอนาคตคาดว่าปริมาณความต้องการน้ำมันปาล์มภายในประเทศจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

ลักษณะทางอนุกรมวิธานของปาล์มน้ำมัน

วงศ์ (Family) : Palmae หรือ Recaceae

จีนัส (Genus) : Elaeis

สปีชีส์ (Species) : guineensis

ชื่อสามัญ (Common name) : oilpalm

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name) : *Elaesis guineensis Jacq.*

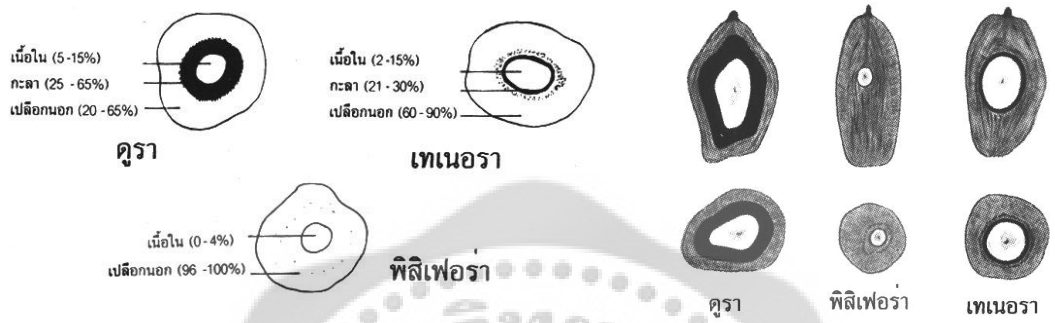
พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ปลูกในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน

พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ซึ่งสามารถแยกความแตกต่างของพันธุ์เหล่านี้ โดยพิจารณาความหนากะลาของผลปาล์มเป็นสำคัญ

1. **พันธุ์ดูรา (Dura)** มีกะลาหนามาก พบมากแถบตะวันออกไกล เช่น พันธุ์เดลีดูรา (Deli dura) ซึ่งให้ผลผลิตค่อนข้างสูง ปัจจุบันมักใช้เป็นต้นแม่พันธุ์สำหรับปรับปรุงพันธุ์เพื่อผลิตลูกผสมเป็นการค้า

2. **พันธุ์ฟิสิเฟอร่า** (Pisifera) เป็นพันธุ์ที่มีกะลาบางมากหรือบางครั้งไม่มีกะลา เมล็ดในเล็ก ขนาดผลเล็ก ช่อดอกตัวเมียมักเป็นหมัน ผลผลิตทะลายต่อต้นต่ำ ไม่เหมาะที่จะปลูกเป็นการค้า นิยมใช้พันธุ์ฟิสิเฟอราเป็นต้นพ่อพันธุ์สำหรับผลิตพันธุ์ลูกผสม

3. **พันธุ์เทเนอรา** (Tenera) เป็นลูกผสมระหว่างพันธุ์แม่ดูราและพันธุ์พ่อฟิสิเฟอรา เป็นพันธุ์ที่มีกะลาบางประมาณ 0.5-4 มิลลิเมตร ผลผลิตทะลายสูง จึงนิยมปลูกเป็นการค้าในปัจจุบัน



ภาพประกอบ 13 พันธุ์ปาล์มน้ำมันชนิดต่างๆ

ที่มา: ฉกรรจ์ สังข์ทอง. (255?). *ปาล์มน้ำมัน*. หน้า 45-46.

ตาราง 4 ลักษณะพันธุ์ปาล์มน้ำมัน

ลักษณะ	ดูรา	ฟิสิเฟอรา	เทเนอรา
1. ความหนากะลา (มม.)	2-8	บางมาก	0.5-4
2. เส้นใยรอบกะลา	ไม่มี	มี	มี
3. ผล/ทะลาย (ร้อยละ)	60	มักเป็นหมัน	60
4. เปลือกนอก/ผล (ร้อยละ)	60-65	92-97	60-90
5. กะลา/ผล (ร้อยละ)	25-30	บางมาก	8-15
6. เนื้อใน/ผล (ร้อยละ)	4-20	3-8	3-28
7. น้ำมัน/เปลือกนอก (ร้อยละ)	50	30	50
8. น้ำมัน/ทะลาย (ร้อยละ)	18-19.5	25-30	22.5-25.5

ที่มา: ฉกรรจ์ สังข์ทอง. (255?). *ปาล์มน้ำมัน*. หน้า 47.

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม (ฉกรรจ์ สังข์ทอง. 255?: 329-335)

ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม และกระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม

1. **กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม** (Mill processing) หลังการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันปาล์ม จะมีการขนส่งผลผลิตเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีกระบวนการสกัดน้ำมัน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม โรงงานแบบมาตรฐานเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูงประมาณ 30-80 ตันต่อชั่วโมง และน้ำมันที่ได้จัดเป็นน้ำมันเกรดเอ เนื่องจากมีการแยกชนิดของน้ำมันปาล์ม สำหรับโรงงานแบบหีบน้ำมันผสมเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างต่ำ และน้ำมันที่สกัดได้เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม วิธีการสกัดน้ำมันแบบที่นิยมใช้ทั่วไป

โรงงานสกัดน้ำมันแบบมาตรฐาน จะมีกระบวนการผลิตขั้นตอนคือ

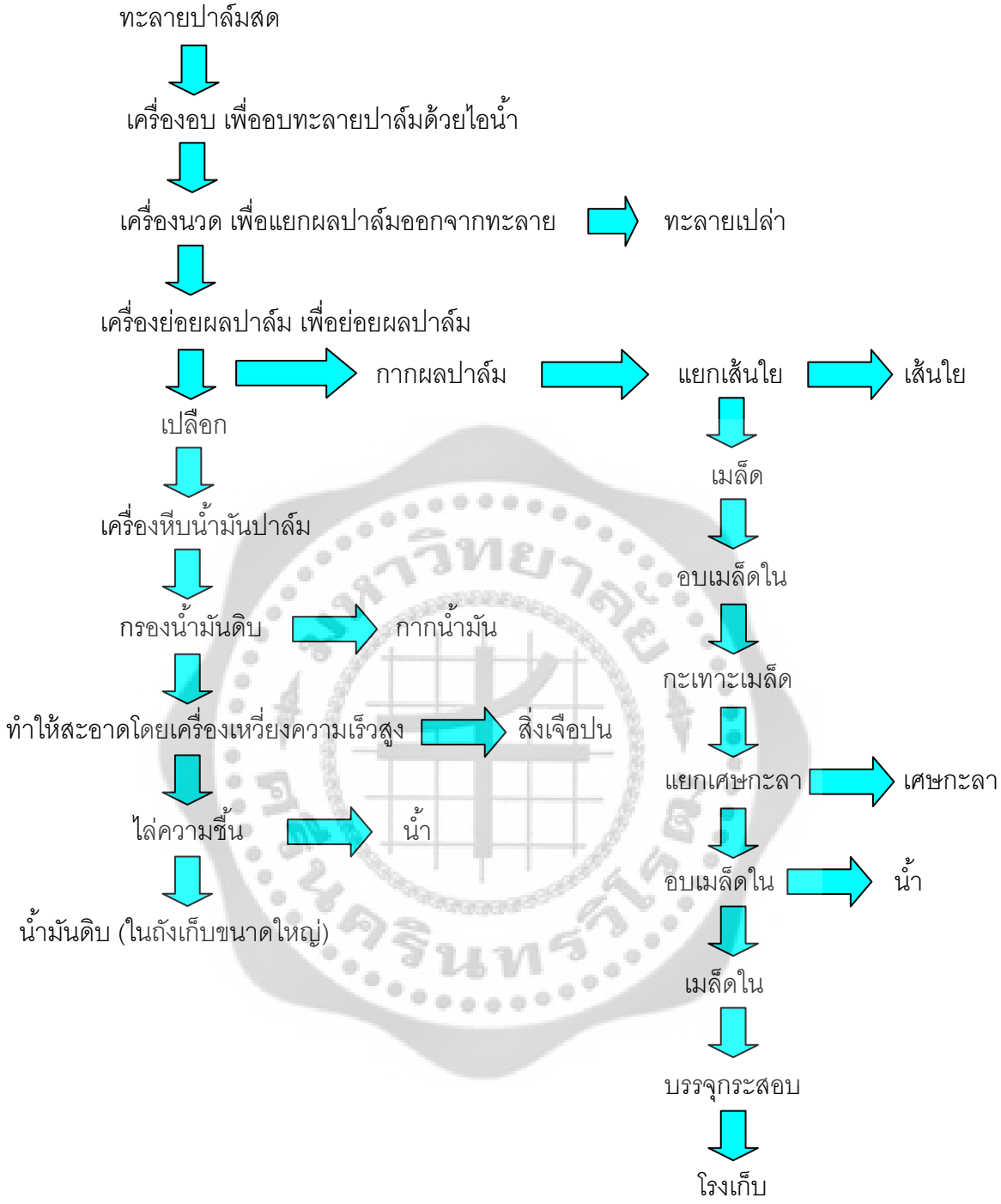
1. การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) อบที่อุณหภูมิ 130-135 องศาเซลเซียส ความดัน 2.5-3 บาร์ (bars) นาน 50-75 นาที การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย

2. การแยกผล (Stripping) เป็นการส่งทะลายเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด

3. การสกัดน้ำมัน (Oil extraction) นำส่วนเปลือกอบที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส นาน 20-30 นาที จากนั้นผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมันประมาณร้อยละ 66 น้ำ ร้อยละ 24 และของแข็ง ร้อยละ 10

4. การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification) นำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัดส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง และไล่น้ำออกเพื่อทำให้แห้ง ส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป น้ำมันปาล์มดิบที่ได้แยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนบนมีลักษณะเป็นของเหลวสีส้มแดง (Crude palm oil olein) ประมาณร้อยละ 30-50 ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขมันสีเหลืองส้ม (Crude palm oil stearin) ประมาณร้อยละ 50-70

สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ด นำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าเครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลาออก และนำเมล็ดในมาอบแห้งให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 จากนั้นบรรจุกระสอบเพื่อรอจำหน่ายหรือหีบน้ำมันต่อไป



ภาพประกอบ 14 ขั้นตอนในการหีบน้ำมันปาล์มดิบแบบแยกเปลือกและเมล็ดในโดยใช้น้ำ

ที่มา: ศักดิ์ศิลป์ โชติสกุล; วินาภรณ์ กุฎีรัตน์; และ กิจจารักษ์ วงษ์กุดเลาะ. (2541). *เอกสารวิชาการเรื่อง ปาล์มน้ำมัน*. หน้า 129.

น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ได้จากกระบวนการสกัด สามารถส่งเข้าสู่โรงงานเพื่อทำให้บริสุทธิ์ หรือจะนำไปแยกส่วน (Fractionation) ก่อน ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

2. **กระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม** (Refine processing) การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม เป็นกระบวนการทำให้น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์พร้อมสำหรับการบริโภค ซึ่งกระบวนการกลั่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ

1. วิธีทางกายภาพ (Physical or Steam refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระ โดยผ่านไอน้ำเข้าไปในน้ำมันร้อน แล้วกลั่นแยกกรดไขมันอิสระและสารที่ให้กลิ่นให้ระเหยออกไป จึงเป็นการกำจัดกลิ่นและทำให้น้ำมันเป็นกลางไปพร้อมกัน การกลั่นน้ำมันปาล์มโดยวิธีทางกายภาพทำได้โดยเตรียมน้ำมันปาล์มดิบหรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ไม่มีฟอสโฟลิปิด โดยกำจัดออกด้วยน้ำแล้วทำปฏิกิริยาด้วยกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 80-85 ประมาณร้อยละ 0.05-0.2 ของน้ำมันปาล์มดิบ ผสมกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส นาน 15-30 นาที เพื่อกำจัดฟอสฟาไทด์ จากนั้นเติมผงฟอกสี (Bleaching earth) ประมาณร้อยละ 0.8-2.0 ของน้ำมันปาล์มดิบ และฟอกสีภายในสภาพสูญญากาศที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส นาน 30-45 นาที จากนั้นนำน้ำมันปาล์มผ่านเข้าเครื่องกรอง จะได้น้ำมันที่ไม่มีฟอสโฟลิปิด และกลั่นโดยใช้ไอน้ำ เพื่อแยกกรดและกำจัดกลิ่น ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส นาน 1-2 ชั่วโมงภายใต้สภาพสุญญากาศ จะได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ หรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์

2. วิธีทางเคมี (Chemical refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สารเคมี ที่นิยมคือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมันให้เกิดเป็นสบู่ จากนั้นแยกสบู่ออกโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง สำหรับความเข้มข้นของด่างที่ใช้มากน้อยแปรผันตามปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

การกลั่นน้ำมันปาล์มด้วยสารละลายด่าง เริ่มด้วยการให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส แล้วเติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 80-85 ปริมาณร้อยละ 0.05-0.2 เพื่อกำจัดฟอสฟาไทด์ เติมสารละลายด่างซึ่งจะทำให้เกิดสบู่ เพื่อทำให้เป็นกลาง แยกสบู่ออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง และล้างไขสบู่ด้วยน้ำ จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำมันเพื่อไล่น้ำให้ระเหยออก จากนั้นนำน้ำมันมาฟอกสีและกำจัดกลิ่นด้วยไอน้ำ จะได้น้ำมันปาล์มที่เรียกว่า Neutralized bleached and Deodosired palm oil

น้ำมันปาล์มที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้วแยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไข เรียกว่าน้ำมันปาล์มสเตียริน และส่วนบนเป็นน้ำมัน เรียกว่าน้ำมันปาล์มโอลีน มีสีเหลืองอ่อนถึงเข้ม รายละเอียดของกระบวนการดังนี้ (คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545: 112)

การเตรียมน้ำมันปาล์มในการตกผลึก โดยการควบคุมอุณหภูมิให้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นของเหลวทั้งหมด โดยทั่วไปควบคุมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

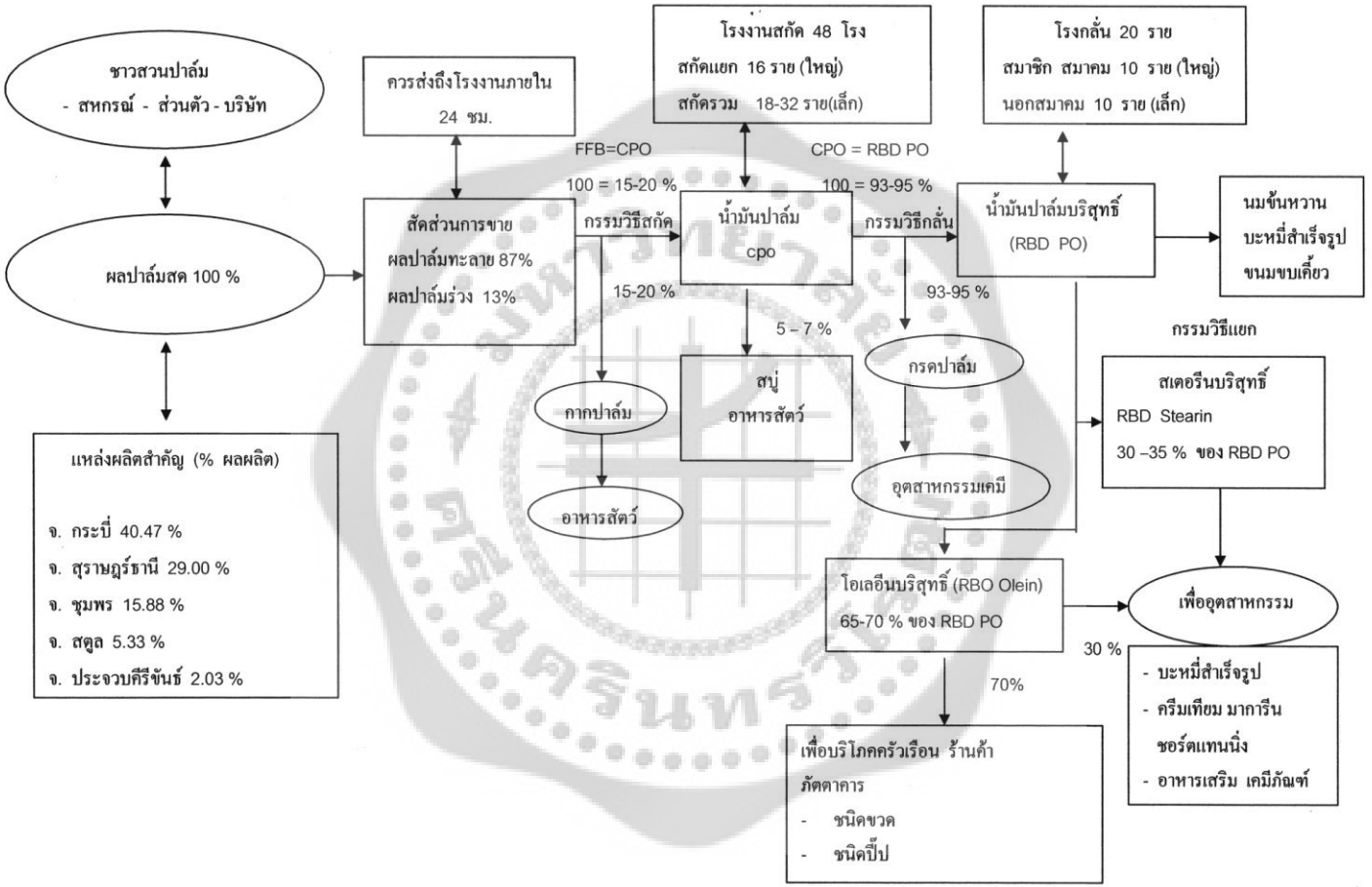
กระบวนการแยกส่วนน้ำมันโดยการตกผลึกไขมัน โดยการลดอุณหภูมิของน้ำมันลงต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิในการตกผลึกขึ้นกับคุณภาพน้ำมันปาล์มโอลีนที่ต้องการ

การกรองแยกน้ำมันที่ผ่านการตกผลึกไขมันแล้วถูกส่งมากรองแยกไขมันออก โดยทั่วไปแล้วสามารถแยกได้น้ำมันปาล์มโอลีนและน้ำมันปาล์มสเตียรีนในอัตราส่วน 60-70 : 30-40

เนื่องจากน้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงได้มีการศึกษาการดัดแปลงคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายมากขึ้น

ผลิตผลพลอยได้ที่สำคัญจากการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มคือ Palm fatty acid distillated (PFAD) ซึ่งนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสบู่ อาหารสัตว์ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสกัดกรดไขมันชนิดต่างๆ หรือการสกัดวิตามินอีในอุตสาหกรรมโอลีโอเคมิคอล

โครงสร้างการผลิต การตลาด ปาล์มน้ำมัน และน้ำมันปาล์มของไทย



ภาพประกอบ 15 โครงสร้างการผลิต การตลาด ปาล์มน้ำมัน และน้ำมันปาล์มของไทย

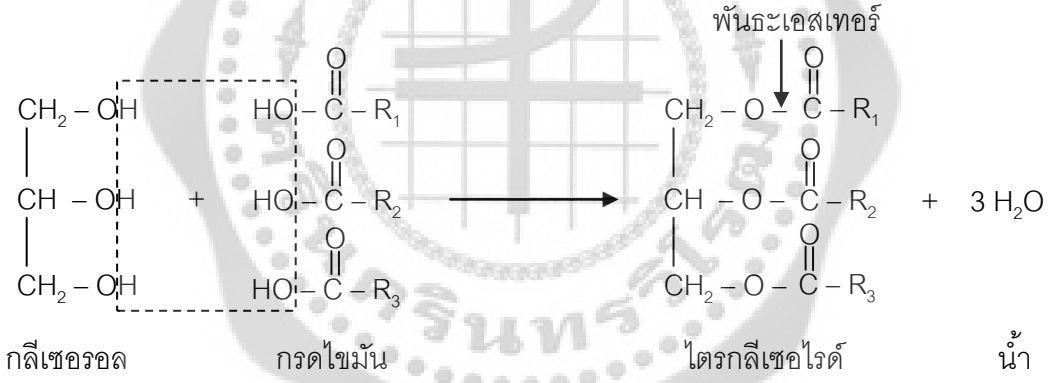
ที่มา: รายงาน/บรรณาธิการ. (2551). สถานการณ์ตลาดปาล์มน้ำมันในประเทศไทย. *วารสารเกษตรธรรมชาติ*. (4): 39.

คุณสมบัติของน้ำมันพืช

ลิปิด (สิริพันธุ์ จุลกรังคะ. 2541: 85-90)

เป็นชื่อทางเคมีสำหรับกลุ่มของสารประกอบที่รวมทั้งไขมัน น้ำมันและสารที่เกี่ยวข้องกับไขมัน เช่น คอเลสเทอรอลและเลซิติน ลิปิดที่พบมากในธรรมชาติและในเนื้อเยื่อของสัตว์และพืช คือ ไขมันและน้ำมัน ไขมันนั้นจะมีสภาพเป็นของแข็งที่อุณหภูมิธรรมดา ส่วนน้ำมันจะมีสภาพเป็นของเหลว ลิปิดที่มาจากแหล่งของสัตว์ส่วนมากจะมีสภาพเป็นของแข็ง ในขณะที่ลิปิดจากแหล่งของพืชจะอยู่ในสภาพของเหลว ดังนั้น โดยทั่วไปมักระบุว่าไขมันสัตว์และน้ำมันพืช สารที่จัดอยู่ในพวกไขมันและน้ำมันนั้นมีคุณสมบัติสำคัญ คือ เป็นสารที่ไม่มีขั้ว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เฮกเซน เบนซีน เป็นต้น

โดยทั่วไปลิปิดประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนมากกว่า 2:1 เช่น ไขมันในเนื้อวัว (Tristearin) มีไฮโดรเจน 110 และออกซิเจน 6 น้ำมันหรือไขมัน 1 โมเลกุลเมื่อแตกตัวจะได้กรดไขมัน 3 โมเลกุล และกลีเซอรอล 1 โมเลกุล กลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นหลักให้กรดไขมันเกาะจับในโมเลกุล กรดไขมันในโมเลกุลจะเป็นชนิดใดก็ได้



ภาพประกอบ 16 โครงสร้างของกลีเซอรอล

ประเภทของลิปิด

สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

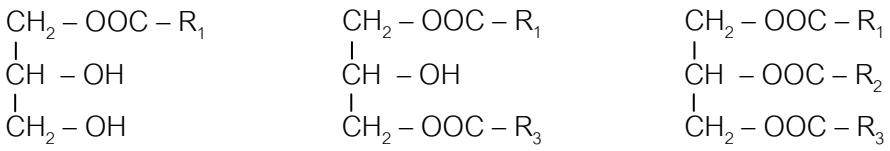
1. ลิปิดธรรมดา (Simple lipids) คือเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ถ้าแอลกอฮอล์นั้นคือกลีเซอรอล จะได้สารประกอบไขมันหรือน้ำมัน พบในไขมันจากพืชและสัตว์ แต่ถ้าแอลกอฮอล์เป็นพวกอื่นไม่ใช่กลีเซอรอลจะได้ไข (Waxes) เช่น ไขจากผึ้ง

โดยทั่วไปไขมันและน้ำมันมีอยู่ 3 รูปคือ

1.1 โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) เป็นไขมันหรือน้ำมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุล รวมกับกรดไขมัน 1 โมเลกุล

1.2 ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) เป็นไขมันหรือน้ำมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุล รวมกับกรดไขมัน 2 โมเลกุล

1.3 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) เป็นไขมันหรือน้ำมันที่เกิดจากกลีเซอรอล 1 โมเลกุล รวมกับกรดไขมัน 3 โมเลกุล เป็นรูปของไขมันที่มนุษย์บริโภคมากที่สุด



1-โมโนกลีเซอไรด์ 1,3-ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์

ภาพประกอบ 17 โครงสร้างของกลีเซอไรด์ชนิดต่างๆ

2. ลิปิดเชิงประกอบ (Compound lipids) คือเอสเทอร์ของกรดไขมันและแอลกอฮอล์ และมีสารประกอบอื่นอยู่ร่วมด้วย เช่น คาร์โบไฮเดรต ฟอสเฟต หรือสารประกอบพวกไนโตรเจน ลิปิดเชิงประกอบที่สำคัญ คือ ฟอสโฟลิปิด (Phospholipid), ไกลโคลิปิด (Glycolipid) และไลโปโปรตีน (Lipoprotein)

3. อนุพันธ์ลิปิด (Derived lipids) คือลิปิดที่ได้จากการแตกตัวของลิปิดธรรมดาหรือลิปิดเชิงประกอบ พวกนี้ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) กลีเซอรอล (Glycerol) สเตอรอยด์ (Steroids)

ไขมันและน้ำมันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ กลีเซอรอล ซึ่งเป็นโครงสร้างที่คงที่ และกรดไขมัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของกรดไขมัน ดังนั้นสมบัติของไขมันจึงขึ้นอยู่กับกรดไขมันเป็นสำคัญ (สุมณฑา วัฒนสินธุ์; และ ทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ. 2543: 238)

กรดไขมัน (Fatty acid) เป็นกรดอินทรีย์ที่พบในลิปิดธรรมดาและลิปิดเชิงประกอบ กรดไขมันทุกตัวประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน สูตรโดยทั่วไปของกรดไขมันคือ $CH_3(CH_2)_nCOOH$ ซึ่ง n มีค่าตั้งแต่ 2 - 24 โดยทั่วไปคาร์บอนอะตอมมักเป็นเลขคู่ คือตั้งแต่ 2 ขึ้นไป เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือกรดน้ำส้ม (CH_3COOH) เป็นกรดไขมันที่โมเลกุลเล็กที่สุด ตามปกติจะไม่พบกรดไขมันในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ หรือรวมกับลิปิดชนิดอื่น กรดไขมันจะแตกต่างกัน 2 ประการคือ ความยาวของห่วงโซ่คาร์บอน และขนาดของความอิ่มตัว

ความยาวของห่วงโซ่คาร์บอน สามารถแบ่งกรดไขมันได้เป็น 3 กลุ่ม

1. กรดไขมันห่วงโซ่ขนาดสั้น (Short chain fatty acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอน 6 ตัว หรือน้อยกว่า

2. กรดไขมันห่วงโซ่ขนาดกลาง (Medium chain fatty acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอน 8-12 ตัว

3. กรดไขมันห่วงโซ่ขนาดยาว (Long chain fatty acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอน 14-20 ตัว

ไขมันที่ประกอบด้วยกรดไขมันห่วงโซ่ขนาดยาวจะมีอิทธิพลต่อความสามารถของไขมันในการละลายในน้ำ โดยที่กรดไขมันห่วงโซ่ยาวจะไม่ละลายในน้ำ กรดไขมันห่วงโซ่ขนาดสั้นและขนาดกลางจะสามารถละลายในน้ำ

ขนาดความอิ่มตัวของไขมัน มีบทบาทสำคัญกับลักษณะทางกายภาพ ไขมันที่อิ่มตัวโดยมากจะมีห่วงโซ่ขนาดยาว จึงมีสภาพเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไขมันหมู ไขมันวัว ในขณะที่ไขมันไม่อิ่มตัวสูงมักมีห่วงโซ่ขนาดกลางจะอยู่ในสภาพของเหลว เช่น น้ำมันตับปลา น้ำมันมะกอก เป็นต้น

ประเภทกรดไขมันตามความอิ่มตัว

กรดไขมันถ้าแบ่งออกตามความอิ่มตัว (Degree of Saturation) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) หมายถึง กรดไขมันที่คาร์บอนในโมเลกุลมีไฮโดรเจนจับอยู่เต็มที่แล้วไม่สามารถรับไฮโดรเจนเข้าไปในโมเลกุลได้อีก แขนของคาร์บอนจะเป็นแขนเดี่ยว ส่วนมากจะอยู่ในสภาพของไขมัน ซึ่งแข็งง่ายเมื่อถูกความเย็นเพียงเล็กน้อย กรดไขมันพวกที่อิ่มตัวนี้ มีสูตรทั่วไป คือ $C_nH_{2n}O_2$ (n = 4,6,8) กรดไขมันที่เป็นกรดไขมันอิ่มตัว เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก เป็นต้น

ชื่อของกรดไขมันอาจเรียกเป็นแบบสามัญ หรือเรียกตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) พวกที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนน้อยกว่า 20 ตัว มักนิยมเรียกแบบสามัญ สามารถเขียนเป็นลักษณะโครงสร้างแบบย่อของกรดไขมันอิ่มตัวได้ดังนี้

$$\underbrace{\text{ตัวเลข}}_{\text{หมายถึง}} \quad : \quad \underbrace{0}_{\text{หมายถึง}}$$

จำนวนอะตอมคาร์บอนทั้งหมดในกรดไขมัน — ไม่มีพันธะคู่

เช่น กรดไขมันมีสูตร $CH_3(CH_2)_{14}COOH$ มีชื่อสามัญว่า กรดพาลมิติก (Plamitic acid) และชื่อ IUPAC ว่ากรดเฮกซาเดคาโนอิก (Hexadecanoic acid) สามารถเขียนโครงสร้างเป็บแบบย่อได้ดังนี้ 16 : 0 (รัตนา สัมพันธชิต. 2548: 105)

ไขมันวัว ไขมันหมู จะมีกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่าไขมันที่มาจากพืช ยกเว้นน้ำมันมะพร้าว ซึ่งมีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณที่มาก กรดพาลมิทิกเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากในธรรมชาติโดยกระจายอยู่ทั่วไปในไขมันทุกชนิดประมาณ ร้อยละ 10-50 ของกรดไขมันที่มีทั้งหมด กรดไขมันที่อิ่มตัวชนิดอื่นที่พบรองลงมา ได้แก่ กรดไมริสทิก (Myristic acid) และกรดสเทียริก (Stearic acid)

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) หมายถึง กรดไขมันที่คาร์บอนในโมเลกุลมีไฮโดรเจนจับเกาะไม่เต็มที่ สามารถรับไฮโดรเจนเข้าไปในโมเลกุลได้อีก แขนของคาร์บอนมีทั้งแขนเดี่ยวและแขนคู่ ส่วนมากจะอยู่ในสภาพของน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้มักเกิดการออกซิเดชันขึ้นได้ง่าย เมื่อถูกออกซิไดส์จะทำให้เกิดการหืนทำให้รสและกลิ่นผิดไป นอกจากนี้ทำให้วิตามินที่ละลายในไขมันเสียไปด้วย คือวิตามินเอ วิตามินดี วิตามินอี และวิตามินเค กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้มีสูตรทั่วไป คือ $C_nH_{2n-2}O_2$ หรือ $C_nH_{2n-4}O_2$ กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้พบมากในน้ำมันพืช น้ำมันปลาและสัตว์ทะเลทั่วไป

เราสามารถเขียนโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นแบบย่อได้ดังนี้

$$\underbrace{\text{ตัวเลข}}_{\text{หมายถึง}} \quad : \quad \underbrace{\text{ตัวเลข}}_{\text{หมายถึง}}$$

จำนวนอะตอมคาร์บอน ทั้งหมดในกรดไขมัน

จำนวนพันธะคู่

เช่น กรดพาลมิโตเลอิก มีสูตร $CH_3(CH_2)_5CH=CH(CH_2)_7COOH$ เขียนเป็นโครงสร้างแบบย่อได้ดังนี้ 16 : 1 (รัตนา สัมพันธชิต. 2548: 106)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว แบ่งได้ 2 ประเภทคือ

2.1 กรดไขมันไม่อิ่มตัว 1 ตำแหน่ง (Mono unsaturated fatty acid, MUFA) คือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีแขนคู่ (Double bond) เพียง 1 แห่งในสูตรโครงสร้าง เช่น กรดโอเลอิก (Oleic acid) หรือโอเมกา 9 กรดพามิโทเลอิก (Palmitoleic acid) กรดวัคซีนิก (Vaccenic acid) พบในน้ำมันพืชบางชนิด เช่น น้ำมันมะกอก น้ำมันถั่วลิสง

2.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (Polyunsaturated fatty acid, PUFA) คือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีแขนคู่ตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไป เช่น กรดไขมันกลุ่มโอเมกา 3 และกรดไขมันกลุ่มโอเมกา 6 กรดไขมันโอเมกา 6 ที่สำคัญได้แก่ กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid, LA) และกรดอะราชิโดนิก (Arachidonic acid, AA) ส่วนกรดไขมันกลุ่มโอเมกา 3 ได้แก่ กรดไลโนเลนิก (Alpha-linoleic acid, LNA) ในปัจจุบันกรดไขมันกลุ่มโอเมกา 3 ที่มีความสำคัญและเป็นที่สนใจมี 2 ชนิดคือ กรดไอโคซาเพนตะอีโนอิก (Eicosapentaenoic acid, EPA) และกรดโดโคซาเฮกซาอีโนอิก (Docosahexaenoic acid, DHA)

โดยทั่วไป น้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังนี้คือ

1. Glycerides ประมาณร้อยละ 95
2. Fatty acid ประมาณร้อยละ 3-5
3. Minor & Trace component ประมาณร้อยละ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย phytonutrient ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง และสารอื่นๆ เช่น corotene, tocopherols, tocotrienols, sterols, glycolipids waxes และ impurities

จากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน สามารถแบ่งน้ำมันปาล์มตามวัตถุดิบที่ใช้สกัดเป็น 2 ชนิดคือ น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบกรดไขมันที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัว : กรดไขมันไม่อิ่มตัว ในสัดส่วน 50 : 50 และ 82 : 18 ตามลำดับ

ตาราง 5 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มและองค์ประกอบอื่นที่สำคัญในน้ำมันปาล์มดิบ

กรดไขมัน	โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม		โรงงานกลั่นน้ำมันปาล์ม				
	น้ำมันปาล์มดิบ	น้ำมันดิบเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันปาล์มโอเลอีน	น้ำมันปาล์มสเตียรีน	กรดไขมันปาล์มกลั่น	น้ำมันเมล็ดในปาล์มโอเลอีน	น้ำมันเมล็ดในปาล์มสเตียริน
Caprylic (C_8 : 0) (ร้อยละ)	-	4.2	-	-	-	4.3	1.9
Capric (C_{10} : 0) (ร้อยละ)	-	3.7	-	-	-	3.6	2.7
Lauric (C_{12} : 0) (ร้อยละ)	-	48.7	-	-	0.3	44.7	56.6
Myristic (C_{14} : 0) (ร้อยละ)	1.1	15.6	1	1.3	1.3	14	22.4
Palmitic (C_{16} : 0) (ร้อยละ)	43.5	7.5	39.8	54	47.1	8.3	8
Stearic (C_{18} : 0) (ร้อยละ)	4.3	1.8	4.4	4.7	4.5	2.3	1.8
Oleic (C_{18} : 1) (ร้อยละ)	39.8	14.8	42.5	32.3	35.7	19.2	5.6
Linoleic (C_{18} : 2) (ร้อยละ)	10.2	2.6	11.2	7	9.3	3.3	0.8
Linolenic (C_{18} : 3) (ร้อยละ)	0.3	-	0.4	0.1	0.5	-	-
Iodine value	53	17.9	58	39.9	-	23	7
องค์ประกอบอื่นที่สำคัญในน้ำมันปาล์มดิบ (ppm)							
Tocopherol/tocotrienol		600-1000	ประโยชน์ : ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องสำอาง ครีมบำรุงผิว เป็นต้น				
Catotene		500-700					
Sterols		250-620					

ที่มา: ธีระ เอกสมทราเมษฐ์. (2551, มิถุนายน). สารพัดประโยชน์ของปาล์มน้ำมัน. *วารสาร For Quality*. 15(128): 72.

จากเนื้อหาเบื้องต้นของวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล สรุปได้ว่า น้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลนั้น ต้องพิจารณาว่าพืชชนิดใดมีศักยภาพนั้น จะแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิศาสตร์ของแหล่งผลิตในแต่ละประเทศ สำหรับประเทศไทยนั้นเมื่อพิจารณาพืชน้ำมันแต่ละชนิดคำนึงถึงปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันในพืชชนิดนั้น และความเหมาะสมของปริมาณการเพาะปลูก ผลผลิตที่ได้พบว่า พืชน้ำมันชนิดต่างๆ มีน้ำมันอยู่ในเมล็ดหรือผลในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา และทานตะวัน จะให้น้ำมันในส่วนที่เป็นเมล็ด ส่วนปาล์มน้ำมัน และมะพร้าว จะให้น้ำมันในส่วนที่เป็นผล ปาล์มน้ำมันสามารถให้ผลผลิตออกมาในรูปของน้ำมัน ถ้าคิดเป็นต่อพื้นที่ต่อปีแล้วสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันทั้งหมด เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชให้ผลผลิตน้ำมันสูง สามารถปลูกได้หลายภาคของประเทศไทย รัฐบาลส่งเสริมเพื่อปลูกเป็นพืชพลังงาน จึงสรุปได้ว่าปาล์มน้ำมันมีความเหมาะสมสุดที่จะเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

ในส่วนของคุณสมบัติของน้ำมันพืชนั้น น้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพของน้ำมันพืชแตกต่างกัน ไขมันนั้นจะมีสภาพเป็นของแข็งที่อุณหภูมิธรรมดา ส่วนน้ำมันจะมีสภาพเป็นของเหลว มีคุณสมบัติสำคัญ คือ เป็นสารที่ไม่มีขั้ว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เฮกเซน เบนซีน เป็นต้น ไขมันและน้ำมันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ กลีเซอรอล ซึ่งเป็นโครงสร้างที่คงที่ และกรดไขมันซึ่งเป็นโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของกรดไขมัน ดังนั้นสมบัติของไขมันจึงขึ้นอยู่กับกรดไขมันเป็นสำคัญ น้ำมันพืชนั้นมีธาตุคาร์บอนระหว่าง 12 ถึง 18 ตัวเป็นองค์ประกอบในกรดไขมัน โดยมีกรดไขมันทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในปริมาณที่แตกต่างกัน ในที่นี้ใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ซึ่งจะประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งน้ำมันปาล์มแต่ละผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณกรดไขมันแตกต่างกัน

แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีสูตรทั่วไปคือ R - OH

เมื่อ R คือ หมู่อัลคิล (อัลเคนที่ขาดไฮโดรเจนไปหนึ่งอะตอม) และเรียกชื่อหมู่เหล่านี้โดยตัด -ane ท้ายชื่อของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกแล้วเติม –yl ลงแทน ตัวอย่างของหมู่อัลคิล เช่น

CH_3-	CH_3CH_2-	$CH_3CH_2CH_2$-	$CH_3CH_2CH_2CH_2$-
methyl	ethyl	n- propyl	n- butyl

CH_3-CH_2- $\lvert$ CH_3	CH_3- CH_2-CH_2- $\lvert$ CH_3	CH_3- CH_2-CH- $\lvert$ CH_3
iso-propyl	iso-butyl	sec-butyl

สูตรโมเลกุลเป็น C_nH_{2n+1} และหมู่ -OH เป็นหมู่เฉพาะของแอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์อาจถือว่าเป็นอนุพันธ์ของอัลเคนที่เกิดจากการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ดังตัวอย่างในตาราง 6 (ประดิษฐ์ มีสุข. 2538: 75)

ตาราง 6 แอลกอฮอล์ที่เป็นอนุพันธ์ของอัลเคนที่เกิดจากการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่ไฮดรอกซิล

ไฮโดรคาร์บอน		แอลกอฮอล์	
CH_4	มีเทน	CH_3OH	เมทิลแอลกอฮอล์
C_2H_6	อีเทน	C_2H_5OH	เอทิลแอลกอฮอล์
C_3H_8	โพรเพน	C_3H_7OH	โพรพิลแอลกอฮอล์

การเรียกชื่อสารประกอบแอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก การเรียกชื่อให้เรียกชื่อหมู่อัลคิลที่มีอยู่ในโมเลกุลของแอลกอฮอล์ แล้วตามด้วยคำแอลกอฮอล์ ดังนี้

CH_3OH	methyl alcohol	CH_3CH_2OH	ethyl alcohol
$CH_3CH_2CH_2OH$	n-propyl alcohol	CH_3CHOH (with CH_3 on the CH)	isopropyl alcohol
$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$	n-butyl alcohol	CH_3CH_2CHOH (with CH_3 on the CH)	sec-butyl alcohol

แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลซับซ้อนขึ้น การเรียกชื่อจะเป็นไปตามระบบ IUPAC โดยใช้ชื่ออัลเคนเป็นหลัก ตัดเอาคำ e ของชื่ออัลเคนออก แล้วเติมคำ ol ลงไปแทน เช่น

CH_3OH	methanol	CH_3CH_2OH	ethanol

สมบัติทั่วไปของแอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์มีจุดเดือดสูงกว่าไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน เพราะว่าแอลกอฮอล์สามารถรวมตัวกันโดยเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนในหมู่เฉพาะของโมเลกุลหนึ่งกับออกซิเจนในหมู่เฉพาะของอีกโมเลกุลหนึ่ง

แอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (คาร์บอน 1-3 อะตอม) จะละลายน้ำได้ดี เพราะว่าแอลกอฮอล์สามารถเกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำได้โดยพันธะไฮโดรเจน เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นการละลายน้ำจะลดลง

แอลกอฮอล์คล้ายกับสารประกอบไฮดรอกไซด์ทางอนินทรีย์คือ สามารถทำปฏิกิริยากับกรด ทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ ได้สารประกอบเอสเทอร์ และอัลคิลเฮไลด์ ตามลำดับ

แหล่งกำเนิดของแอลกอฮอล์ (ทบวงมหาวิทยาลัย. 2540: 309)

เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เป็นแอลกอฮอล์ตัวเล็กที่สุด เป็นของเหลวที่ระเหยง่าย มีจุดเดือด 65 องศาเซลเซียส โรงงานอุตสาหกรรมใช้เมทานอลเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้เป็นตัวทำละลายสีน้ำยาขัดเงา ยาลอกสี ใช้เป็นเชื้อเพลิงจุดตะเกียง เป็นต้น เมทานอลสามารถดูดซึมได้ทางผิวหนัง ลมหายใจ และดูดซึมได้เร็วในทางเดินอาหาร แล้วกระจายเข้าสู่กระแสเลือด เนื่องจากเมทานอลมีลักษณะคล้ายคลึงกับเอทานอลมาก ทั้งกลิ่นและสี แต่เมทานอลมีพิษสูงกว่าเอทานอล (สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. 2550: 38) เป็นสารมีพิษ ถ้าใช้ดื่มอาจทำให้ตาบอดและถึงแก่ความตายได้

ในครั้งแรกเมทานอลเตรียมได้จากการกลั่นทำลายไม้ บางทีเรียกว่า แอลกอฮอล์ชนิดที่ได้จากไม้ (Wood Alcohol) ในปัจจุบันเตรียมเมทานอลเป็นอุตสาหกรรมได้โดยใช้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยมีคะตะลิสต์ ดังสมการ

$$CO + 2\,H_2 \xrightarrow[350\text{-}400\ ^{\circ}C,\ 3.0 \times 10^{7}\ \text{pascal}]{Cr_2O_3 / ZnO} CH_3OH$$

ภาพประกอบ 18 ปฏิกิริยาการเตรียมเมทานอลในระดับอุตสาหกรรม

สำหรับปฏิกิริยาการเกิดทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลนั้น แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะเป็นแอลกอฮอล์โมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 1 โมเลกุลที่ตำแหน่งแรก หรือตำแหน่งที่สอง มีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 1-8 อะตอม ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์ โดยนิยมใช้เมทานอล และเอทานอลมากที่สุด เนื่องจากราคาถูก หาง่าย และมีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่เหมาะสม คือ มีความเป็นขั้วและสายโมเลกุลสั้น ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาให้ละลายได้ดียิ่งขึ้น (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2550: 133)

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **แอลกอฮอล์** เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีสูตรทั่วไปคือ R - OH แอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (คาร์บอน 1-3 อะตอม) เช่น เมทานอล (CH_3OH) เป็นแอลกอฮอล์ตัวเล็กที่สุด เป็นของเหลวที่ระเหยง่าย มีจุดเดือด 65 องศาเซลเซียส โรงงานอุตสาหกรรมใช้เมทานอลเป็นจำนวนมาก โดยใช้เป็นตัวทำละลาย สามารถละลายน้ำได้ดี เพราะสามารถเกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำได้โดยพันธะไฮโดรเจน แต่ถ้าแอลกอฮอล์มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นการละลายน้ำจะลดลง ปฏิกิริยาการเกิดทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลนั้น ในที่นี้

จะใช้เมทานอล เนื่องจากราคาถูก หาง่าย มีความเป็นขั้วและสายโมเลกุลสั้น สามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาให้ละลายได้ดียิ่งขึ้นเกิดสารประกอบเอสเทอร์ อีกทั้งสามารถเทียบเคียงกับลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันได้

เอนไซม์

เป็นกลุ่มโปรตีนที่มีหน้าที่แตกต่างจากโปรตีน และมหีวโมเลกุลทั่วไป คือ มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตได้อย่างประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่งสังเคราะห์เป็นหลายล้านเท่าด้วยปริมาณเอนไซม์เพียงระดับไมโครโมลาร์ นอกจากนี้เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ภายใต้ภาวะไม่รุนแรงซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับภาวะภายในเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตทั่วไป (ปราณี อ่านเปรื่อง. 2543: 1)

สมบัติทั่วไปของเอนไซม์ มีดังนี้ (อุมาพร อุประ; และ อรวินท์ เลาหรัชตนันท์. 2543: 122-125)

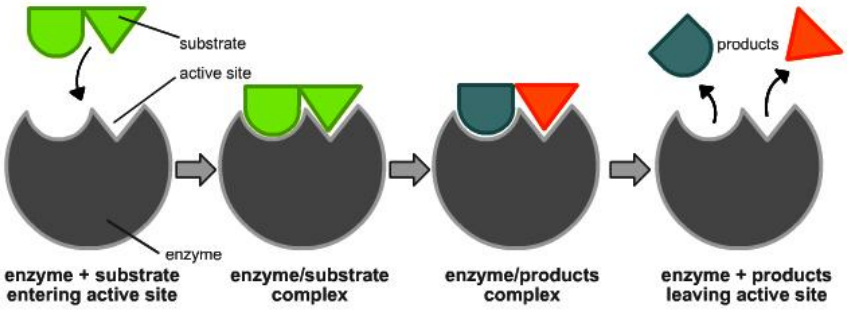
1. เอนไซม์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นโปรตีน ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายๆ ตัวจับกันแบบลูกโซ่ด้วยพันธะเปปไทด์ ซึ่งลูกโซ่ของเปปไทด์จะเรียงกันอย่างซ้ำๆ เรียกว่า ลูกโซ่โพลีเปปไทด์

2. เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารพวกโปรตีน ดังนั้นจึงสามารถแสดงคุณสมบัติบางอย่างคล้ายกับโปรตีนทั่วไป เช่น ละลายได้ในน้ำ กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ที่เจือจาง สามารถตกตะกอนในแอลกอฮอล์เข้มข้น และเสียสภาพธรรมชาติเมื่อถูกความร้อนสูง

3. เอนไซม์เป็นโปรตีนที่มีรูปร่างทรงกลม (Globular protien) ซึ่งเกิดจากการเรียงลำดับของกรดอะมิโนและขดตัวเป็นโครงรูป (Conformation) ที่มีลักษณะจำเพาะ จึงมีหมู่ธาตุต่างๆ ที่ทำหน้าที่สำคัญอยู่ในโมเลกุล เช่น อะมิโนและหมู่คาร์บอกซิล หมู่ธาตุเหล่านี้จะทำหน้าที่จับกับสารที่ทำปฏิกิริยาหรือที่เรียกว่า สับสเตรท (Substrate) คือสารตั้งต้นที่จะเข้าทำปฏิกิริยาโดยมีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง เกิดเป็นสารประกอบซึ่งเรียกว่า สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์-สับสเตรท (Enzyme-Substrate complex) และจะสลายตัวต่อไปได้ผลิตผลใหม่ (New product) กับเอนไซม์เดิม ดังสมการ

$$\text{Substrate (S)} + \text{Enzyme (E)} \longrightarrow \text{Enzyme-Substrate complex (ES)}$$

$$\text{Enzyme-Substrate complex (ES)} \longrightarrow \text{New Product} + \text{Enzyme}$$

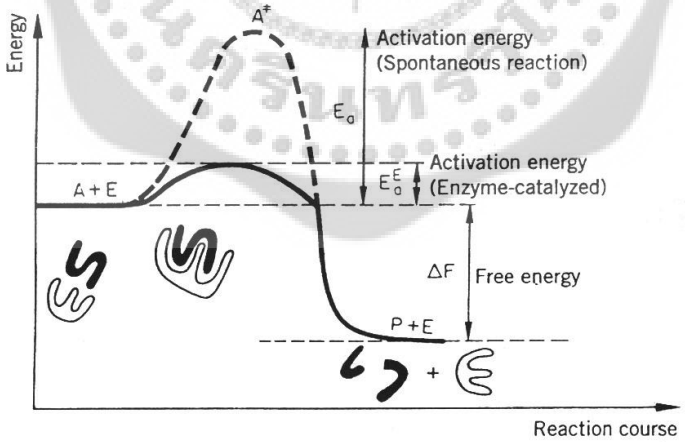


ภาพประกอบ 19 การจับระหว่างเอนไซม์กับสับสเตรททำให้เกิดผลิตผลใหม่

ที่มา: วิกิพีเดีย, สารานุกรมเสรี. (2555). *เอนไซม์.* สืบค้นเมื่อ 6 มีนาคม 2555, จาก http:// th.wikipedia.org/wiki/เอนไซม์

4. จากการจับตัวกันของเอนไซม์ และสับสเตรทในข้อ 3 แล้วเกิดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ทำให้เอนไซม์กลายเป็นตัวเร่งชีวภาพที่มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาในชีวิตทุกชนิด ทำให้สิ่งมีชีวิตทุกชนิด ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถดำเนินชีวิตต่อไปได้อย่างปกติ โดยที่เอนไซม์ทำหน้าที่ดังนี้

4.1 เร่งปฏิกิริยา เอนไซม์ต่างๆ ที่มีชีวิตจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้ดำเนินไปได้ ในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์นั้น เอนไซม์จะไปช่วยลดพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ของปฏิกิริยาให้ต่ำลง ($E_a > E_a^E$) ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น การเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้หลายเท่า



ภาพประกอบ 20 การเปลี่ยนพลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนสาร ทั้งในกรณีที่ไม่มีเอนไซม์ E_a (- - -) และมีเอนไซม์ E_a^E (——)

ที่มา: ปราณี อ่านเปรื่อง. (2543). *เอ็นไซม์ทางอาหาร.* หน้า 4.

4.2 ควบคุมเมตาบอลิซึม เอนไซม์บางชนิดมีคุณสมบัติสามารถควบคุมเมตาบอลิซึมในร่างกายให้ดำเนินไปอย่างเหมาะสม ทำให้ปฏิกิริยาต่างๆ เกิดขึ้นในลักษณะที่มีความสมดุลซึ่งกันและกันในบริเวณที่สามารถรวมตัวกับสับสเตรทได้ เรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณเร่ง (Active site) และมีบริเวณที่สามารถรวมตัวกับตัวยับยั้งหรือตัวกระตุ้นได้ เรียกว่า บริเวณอัลโลสเตริก (Allosteric site) บริเวณทั้ง 2 ชนิดนี้ อาจอยู่ที่เดียวกันหรือคนละที่ก็ได้

5. เอนไซม์หลายชนิดต้องมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโปรตีนกับส่วนที่ไม่ใช่โปรตีนจึงจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้ เราเรียกส่วนที่ไม่ใช่โปรตีนนี้ว่า โคแฟกเตอร์ (Cofactor) ซึ่งเป็นไอออนของโลหะหรือโคเอนไซม์ (coenzyme) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อน

6. เอนไซม์แต่ละชนิดสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ pH ใด pH หนึ่งเท่านั้น

7. เอนไซม์แต่ละชนิดทำงานได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น

8. เอนไซม์มีคุณสมบัติที่สำคัญที่แตกต่างจากตัวเร่งอื่นๆ คือ มีความจำเพาะเจาะจงและมีประสิทธิภาพ ซึ่งความจำเพาะเจาะจงของเอนไซม์หมายถึง การที่เอนไซม์เลือกสับสเตรทที่ทำปฏิกิริยาโดยสับสเตรทสามารถเข้าจับบริเวณเร่งของเอนไซม์ได้อย่างพอดี และการจับกันระหว่างสับสเตรทกับเอนไซม์อาศัยการเข้ากันของขนาดรูปร่างและด้านสมบัติทางเคมีด้วย และในบางกรณีการจับกันอย่างพอเหมาะระหว่างเอนไซม์กับสับสเตรทอาจต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงโครงรูปของบริเวณเร่งเล็กน้อยด้วย ส่วนประสิทธิภาพหมายถึงขีดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งโดยทั่วไปแล้วจะเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง 10^{8} - 10^{20} เท่า ซึ่งหมายความว่า ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์มีค่าสูงมาก

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **เอนไซม์** เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นโปรตีน ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายๆ ตัวจับกับแบบลูกโซ่ด้วยพันธะเปปไทด์ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา สามารถทำงานได้ดีที่ pH ใด pH หนึ่งเท่านั้น ทำงานได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น มีความจำเพาะเจาะจงต่อสับสเตรท มีขีดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง 10^{8}-10^{20} เท่า

4. เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่นำมาใส่ปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราของปฏิกิริยาเคมี และสามารถนำกลับออกมาได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง สารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น จะเรียกว่า ตัวเร่ง (Catalyst) ส่วนสารที่เติมลงไปปฏิกิริยาแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงกว่าเดิมเรียกว่า ตัวยับยั้ง (Inhibitor) (ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์. 2535: 144) หน้าที่

โดยทั่วๆ ไปของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนหนึ่งของกลไกที่จะทำให้สารตั้งต้นสามารถเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้โดยง่าย (ภาณี วัฒนโอฬาร. 2535: 183)

ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

สามารถแบ่งปฏิกิริยาคะตะไลซิสจากเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalytic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว ได้แก่ การใช้กรดและเบสที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของสารละลายน้ำตาลกลูโคส

2. ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalytic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ต่างสถานะ หรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยส่วนมากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นแก๊ส หรือของเหลว หรือแก๊สรวมอยู่กับของเหลว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะคุณสมบัติทางเคมีของผิวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาคะตะไลซิส โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเฉพาะที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมักจะเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ และไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปถึงเนื้อในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับ อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัมผัสกับสารตั้งต้นและความเข้มข้นของโมเลกุลที่ดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

3. ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยมีความเกี่ยวข้องกับวิถีของการดำเนินปฏิกิริยาชีวเคมี และอยู่กึ่งกลางระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (เอนไซม์เป็น Mobilized enzyme) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (เอนไซม์เป็น Immobilized enzyme)

เอนไซม์ตรึงรูป

การตรึงเอนไซม์ (สุนันทา ภิญญาวัธน์. 2542: 47-67)

เอนไซม์เป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพสูง มีความจำเพาะต่อสับสเตรท โอกาสเกิดผลผลิตข้างเคียงน้อย สามารถเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ และความดันปกติ ภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาอย่างอ่อน และไม่รุนแรง อย่างไรก็ตามการนำเอนไซม์ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังมีข้อจำกัดอีกมาก สาเหตุส่วนใหญ่คือ เอนไซม์ยังไม่เสถียรพอ และมีราคาค่อนข้างแพง นำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้ ทำให้

ต้นทุนการผลิตทางอุตสาหกรรมสูง การตรึงเอนไซม์รูป (Enzyme immobilized) เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดข้อจำกัดเหล่านั้น เอนไซม์ที่ถูกตรึงแล้วเรียกว่าเอนไซม์ตรึงรูป (Immobilized enzyme) เอนไซม์อิสระ (Free enzyme) ซึ่งปกติละลายน้ำ เมื่อนำไปจับตัวพยุง (Carrier) ด้วยการสร้างพันธะระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุง หรือใช้ตัวพยุงห่อหุ้มเอนไซม์ไว้ จะได้เอนไซม์ตรึงรูปที่ไม่ละลาย

ข้อดีของเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้เปรียบกว่าเอนไซม์อิสระ

1. เอนไซม์มีเสถียรภาพมากขึ้นกว่าเดิมถ้าวิธีการตรึงนั้นเหมาะสม
2. ใช้สภาวะการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างออกไปจากเอนไซม์อิสระได้
3. แยกสารผลิตภัณฑ์ออกได้ง่าย
4. นำเอนไซม์กลับมาใช้ซ้ำและต่อเนื่องกันได้หลายครั้ง
5. ลดต้นทุนการผลิต

ข้อเสียของเอนไซม์ตรึงรูปเมื่อเปรียบกว่าเอนไซม์อิสระ

1. การสูญเสียแอคติวิตีบางส่วนของเอนไซม์ในขั้นตอนการตรึง
2. แอคติวิตีหรืออัตราเร็วของปฏิกิริยาของเอนไซม์ตรึงรูปลดลง
3. ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการตรึงเอนไซม์

เอนไซม์อิสระเมื่อนำไปตรึงกับตัวพยุงที่ละลายน้ำ เช่น โพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ ก็จะได้เอนไซม์ตรึงรูปที่ละลายน้ำ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเอนไซม์ตรึงรูปที่ไม่ละลายน้ำเท่านั้น

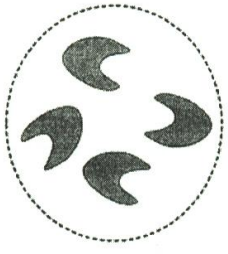
ประเภทของเอนไซม์ตรึงรูป

เอนไซม์ตรึงรูปเป็นเอนไซม์ที่โมเลกุลถูกจับหรือกักไว้ในขอบเขตจำกัด และยังสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดังเดิม การแบ่งประเภทของเอนไซม์ตรึงรูปนั้น แบ่งตามวิธีการตรึงเอนไซม์

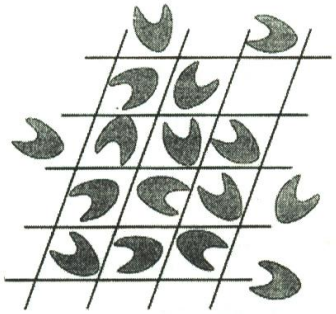
วิธีการตรึงเอนไซม์เพื่อให้ได้เอนไซม์ตรึงรูปที่ไม่ละลายน้ำมีด้วยกันหลายวิธี

การดูดซับทางกายภาพ (Adsorption)

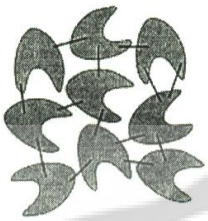
การจับแบบโควาเลนต์ (Covalent binding)



การห่อหุ้มในแคปซูลขนาดเล็ก (Encapsulation)



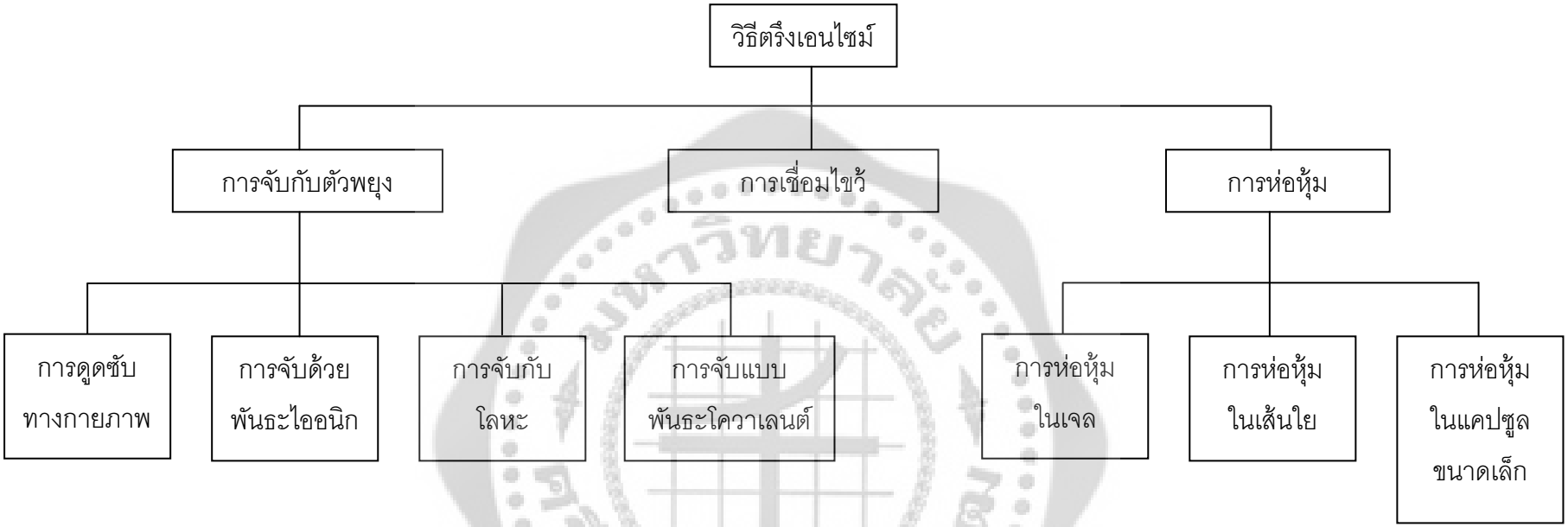
การห่อหุ้มในเจล (Entrapment)



การเชื่อมไขว้ (Cross-Linking)

ภาพประกอบ 21 แสดงการตรึงเอนไซม์

ที่มา: สุนันทา ภิญญาวัธน์. (2542). *เอกสารการประชุมเชิงปฏิบัติการ เรื่องเอนไซม์เทคโนโลยี*. หน้า 48.



ภาพประกอบ 22 วิธีตรึงเอนไซม์เพื่อให้ได้เอนไซม์ตรึงรูปที่ไม่ละลายน้ำ

ที่มา: สุนันทา ภิญญาวัธน์. (2542). *เอกสารการประชุมเชิงปฏิบัติการ เรื่องเอนไซม์เทคโนโลยี*. หน้า 49.

ตัวพยุงสำหรับตรึงเอนไซม์

องค์ประกอบที่สำคัญ 3 อย่างในการตรึงเอนไซม์ คือ เอนไซม์ ตัวพยุงในการตรึงและวิธีการตรึงเอนไซม์เข้ากับตัวพยุง ชนิดของตัวพยุงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ตรึงรูปเป็นอย่างมาก ควรเลือกใช้ให้เหมาะสม ตัวพยุงสำหรับตรึงเอนไซม์ควรมีลักษณะและสมบัติดังต่อไปนี้

1. ไม่ละลายน้ำ
2. มีพื้นที่ผิวมากเพื่อใช้ในการจับยึด
3. มีการซึมผ่านของสารได้
4. มีลักษณะการชอบน้ำ
5. มีความทนทานต่อสารเคมี ความร้อน และแรงกระทบ
6. มีรูปร่างและขนาดที่พอเหมาะ
7. ไม่ถูกทำลายหรือย่อยสลายโดยจุลินทรีย์
8. นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

ตัวพยุงแบ่งเป็น 2 ประเภทตามสมบัติทางเคมี คือสารอินทรีย์ ซึ่งแบ่งเป็นโพลีเมอร์ธรรมชาติและโพลีเมอร์สังเคราะห์ กับสารอนินทรีย์

สารอินทรีย์

เอนไซม์ตรึงรูปที่ผลิตทางการค้ามักใช้ตัวพยุงเป็นสารอินทรีย์ เพราะมีหมู่ฟังก์ชันนัลมากที่จะตรึงเอนไซม์ได้อย่างดี และมีประสิทธิภาพ หรืออาจดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันได้หลากหลายก่อนนำไปตรึงเอนไซม์ การใช้สารอินทรีย์อาจมีข้อเสียบ้าง เนื่องจากสมบัติทางกายภาพบางประการที่จะทำให้เอนไซม์ตรึงรูปนั้นสูญเสียความเสถียรได้ง่าย เนื่องจากสารเคมี ความร้อน และจุลินทรีย์

สารอนินทรีย์

การพัฒนาเอนไซม์ตรึงรูปมักใช้สารอินทรีย์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสารอนินทรีย์มีหมู่ฟังก์ชันน้อย ส่วนมากมีแต่หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเฉพาะกับหมู่อะมิโน หรือหมู่คาร์บอกซิลิกของโปรตีนเท่านั้น ทั้งๆ ที่สมบัติหลายๆ อย่างของสารอนินทรีย์เหมาะกับขบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น ทนต่อแรงกระทบได้สูง ทนทานต่อความร้อน จุลินทรีย์ และตัวทำละลายอินทรีย์ ใช้สะดวก มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลายครั้ง โครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้จะเปลี่ยน pH อุณหภูมิ และความดันไปค่อนข้างมาก

วิธีตรึงเอนไซม์

การจับกับตัวพยุง (Carrier binding)

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นวิธีการตรึงเอนไซม์ที่ไม่ยาก ได้ผลดีและไม่สิ้นเปลือง เอนไซม์จับกับผิวภายนอกของตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำ ด้วยพันธะนอน-โควาเลนต์ ซึ่งเป็นแรงอย่างอ่อน เช่น พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอวาลส์ แรงไฮโดรโฟบิก ฯลฯ เป็นต้น จึงไม่กระทบต่อโครงรูป (Conformation) ของเอนไซม์ หรือมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นเอนไซม์ที่ได้จึงมีแอคติวิตีค่อนข้างสูง เมื่อนำไปใช้งานจริง เอนไซม์อาจหลุดออกจากตัวพยุงได้ เนื่องจากแรงยึดเป็นแรงอย่างอ่อน ควรทำการเชื่อมไขว้ควบคู่ด้วย ต้องมีการควบคุมเวลา pH อุณหภูมิ ความแรงของอิออน (Ionic strength) ปริมาณเอนไซม์ ตัวพยุง และธรรมชาติของตัวทำละลายเป็นอย่างดี

ทำได้ง่ายโดยการผสมเอนไซม์กับตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วแยกเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้ออก ตัวพยุงที่ใช้มักเป็นสารอนินทรีย์ เช่น อะลูมินา ซิลิกา คาร์บอนกัมมันต์ แก้วมีรูพรุน เบนโทไนท์ ซีไลท์ คาโอลิไนท์ ไฮดรอกซีอะปาไทท์ ไดอะตอมมาเซียลเอิร์ธ ฯลฯ เป็นต้น

การจับด้วยพันธะไอออนิก (Ionic binding)

วิธีนี้เอนไซม์จับกับผิวภายนอกของตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำด้วยพันธะไอออนิก ซึ่งเป็นแบบนอน-โควาเลนต์เช่นกัน แต่พันธะไอออนิกจะแข็งแรงกว่าแรงอย่างอ่อนที่ใช้ในการดูดซับทางกายภาพ เอนไซม์และตัวพยุงจะมีชนิดของประจุตรงกันข้าม การตรึงเอนไซม์แบบนี้มีผลกระทบต่อโครงรูปของเอนไซม์น้อย แรงยึดระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุงจะเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัดถ้าเปลี่ยน pH หรือความแรงของอิออน

ตัวพยุงที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีหมู่แลกเปลี่ยนประจุ เช่น DEAE-cellulose, DEAE-sephadex, CM-cellulose, CM-sephadex, Amberlite IRA และ Amberlite IRC เป็นต้น

การจับกับโลหะ (Metal Binding)

วิธีนี้ใช้สมบัติคีเลต (Chelating properties) ของโลหะทรานสิชัน ได้แก่ ไททาเนียม เซอร์โคเนียม วานาเดียม เหล็ก และดีบุก ที่จะสร้างคอมเพลกซ์ระหว่างตัวพยุงกับเอนไซม์ การใช้เกลือคลอไรด์ หรือเกลือซัลเฟตของโลหะทรานสิชัน หรือจะใช้ออกไซด์ของโลหะดังกล่าวในรูปผลึก ซึ่งมีน้ำอยู่ด้วยซึ่งได้จากการตกผลึกมาจากเกลือของมัน ทำปฏิกิริยากับตัวพยุงให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานสิชัน กลุ่มนิวคลีโอไฟล์ เช่น หมู่ -OH, $-NH_2$, -SH เป็นลิแกนด์ที่ดีสำหรับโลหะทรานสิชัน ดังนั้นจึงคาดว่าไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบนตัวพยุงจะเป็นตัวไปเชื่อมกับหมู่ที่ว่องไวดังกล่าวบนโมเลกุลเอนไซม์ให้ได้เป็นเอนไซม์ตรึงรูป

ตัวพยุงที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส ไคติน อัลจิเนต ที่เป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่ ใยแก้ว ซีไลท์ ซิลิกา อย่างไรก็ตามก็ต้องระวังว่าโลหะอาจไปมีผลต่อเสถียรภาพของเอนไซม์ตรึงรูป เพราะโลหะบางชนิดอาจขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ได้

การจับแบบพันธะโควาเลนต์ (Covalent binding)

การตรึงเอนไซม์วิธีนี้มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำ รีเอเจนต์ และภาวะการเตรียมจะยุ่งยากและรุนแรงกว่า 3 วิธีแรก หมู่ฟังก์ชันของเอนไซม์ที่จับกับตัวพยุงต้องเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นที่ไม่มีความสำคัญในการเร่งปฏิกิริยา ต้องคอยป้องกันมิให้รีเอเจนต์ต่างๆ ที่ใช้เข้าไปทำปฏิกิริยาตรงบริเวณเร่งเอนไซม์ เพราะเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้จะสูญเสียแอคติวิตี การตรึงเอนไซม์ต้องพิจารณาถึง

1. หมู่ฟังก์ชันของเอนไซม์ที่จะจับกับตัวพยุงด้วยพันธะโควาเลนต์ที่ภาวะอย่างอ่อนหรือรุนแรงน้อยที่สุด
2. หมู่ฟังก์ชันของตัวพยุง
3. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเอนไซม์และตัวพยุง ถ้าวิธีการตรึงนี้เหมาะสม ไม่ทำลายสภาพธรรมชาติของเอนไซม์ ก็จะได้เอนไซม์ตรึงรูปที่มีเสถียรภาพมากยิ่งกว่าเอนไซม์ตรึงรูปแบบ 3 วิธีแรก ตัวพยุงส่วนใหญ่จะมีหมู่ฟังก์ชันเพียงหมู่ -OH, $-NH_2$, $-CO-NH_2$ และ -COOH ฯลฯ ซึ่งไม่ว่องไวพอ ต้องทำการก่อกัมมันต์ให้ว่องไวมากขึ้น แล้วจึงไปทำปฏิกิริยาสร้างพันธะโควาเลนต์กับเอนไซม์ ปฏิกิริยาดังกล่าวใช้เชื่อมพันธะโควาเลนต์ระหว่างตัวพยุงกับเอนไซม์ในการตรึงเอนไซม์

การเชื่อมไขว้ (Cross-Linking)

เป็นวิธีการตรึงเอนไซม์ที่มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างเอนไซม์กับสารเชื่อมไขว้ โดยไม่ต้องอาศัยตัวพยุง ทำให้เอนไซม์หลายๆ โมเลกุลเกาะกลุ่มกันใหญ่ขึ้น และไม่ละลายน้ำ สารเชื่อมไขว้นี้จะเชื่อมภายในโมเลกุลของเอนไซม์ (Intramolecular) หรือเชื่อมระหว่างต่างโมเลกุลเอนไซม์ (Intermolecular) ก็ได้ สารเชื่อมไขว้เป็นพวก Homobifunctional หรือ Heterobifunctional reagent คือมีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ที่เหมือนกัน หรือ 2 หมู่ที่แตกต่างกันตามลำดับ หรืออาจเป็น Heteromultifunctional reagent ก็จะมีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ที่แตกต่างกัน การตรึงเอนไซม์วิธีนี้มีผลต่อโครงรูปและแอคติวิตีของเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้

การห่อหุ้ม (Entrapment)

เป็นวิธีการห่อหุ้มเอนไซม์ไว้ในโพลีเมอร์ หรือเยื่อบางที่ยอมให้สารบางชนิดผ่านได้ (Semi-Permeable membrane) เอนไซม์เป็นโมเลกุลโปรตีนขนาดใหญ่ จะถูกกักไว้ข้างในออกมาไม่ได้ ขณะเดียวกันสับสเตรทหรือผลิตภัณฑ์ซึ่งขนาดของโมเลกุลเล็กกว่ามากจะซึมผ่านเข้าออกได้อย่างอิสระ จึงเหมาะที่จะใช้กับปฏิกิริยาของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ วิธีการตรึงนี้ไม่มีการสร้างพันธะใดๆ ระหว่างเอนไซม์กับสารห่อหุ้ม

สารห่อหุ้มที่ใช้ได้แก่ โพลีเมอร์สังเคราะห์ เช่น โพลีอะคริลาไมด์ที่เชื่อมไขว้แล้ว โพลีอะคริลิก โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และโพลีธรรมชาติ เช่น คอลลาเจน เจลาติน อะการ์ และอะกาโรส อัลจิเนต K-คาราจีแนน ไคโตแซน ฯลฯ เป็นต้น

ตาราง 7 ข้อดีและข้อเสียการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีต่างๆ

ข้อเปรียบเทียบ	เทคนิคการตรึงเอนไซม์				
	การเชื่อมไขว้	การดูดยึดทางกายภาพ	การจับด้วยพันธะไอออนิก	การจับแบบพันธะโควาเลนต์	การห่อหุ้ม
1. วิธีการเตรียม	สะดวก	สะดวก	สะดวก	ยุ่งยาก	ยุ่งยาก
2. การจับระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุง	แข็งแรง	อ่อน	ปานกลาง	แข็งแรง	ปานกลาง
3. การนำตัวพยุงกลับมาใช้ใหม่	ไม่ได้	ได้	ได้	ได้ในบางกรณี	ไม่ได้
4. ต้นทุนในการตรึง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	สูง
5. ความคงตัวของเอนไซม์ตรึงรูป	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง
6. การประยุกต์ใช้งาน	ไม่ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้
7. การป้องกันการสลายตัวของเอนไซม์จากจุลินทรีย์	ได้บางครั้ง	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้

ที่มา: จันทรนาถ พลชำนิ. 2548: 19-20; อ้างอิงจาก Kennedy และ Cabral: 1986.

เอนไซม์ไลเปส (Lipases) (ณกัญภัทร จินดา และ ทรัพย์ทวี ฝุ่นทอง. 2549: 115)

ไลเปส เป็นเอนไซม์กลุ่มไฮโดรเลส มีชื่อสามัญว่า “ไลเปส” และมีชื่อตามระบบว่า กลีเซอรอล เอสเทอร์ ไฮโดรเลส (Glycerol ester hydrolase) และมีชื่อตามรหัส คือ E.C. 3.1.1.3 ซึ่งเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในไขมัน,น้ำมัน เมื่อไขมันถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์แล้วจะได้ผลผลิตเป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ นอกจากเร่งปฏิกิริยาย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ของไขมัน

แล้วไลเปสยังเร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะ (Transesterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาได้ในระบบที่มีน้ำน้อยหรือในระบบของตัวทำละลายอินทรีย์

แหล่งผลิตไลเปสที่สำคัญได้แก่ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เอนไซม์ไลเปสที่ผลิตและจำหน่ายทางการค้าส่วนใหญ่ผลิตได้จากจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากมีกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยาก และสามารถควบคุมปริมาณการผลิตได้ง่าย

ไลเปสที่ผลิตได้จากจุลินทรีย์มี 2 ลักษณะคือ ไลเปสที่ผลิตแล้วสะสมภายในเซลล์ (Intracellar lipase) และไลเปสที่ถูกขับออกนอกเซลล์ (Extracellular lipase) อย่างไรก็ตามมีจุลินทรีย์บางชนิดสะสมไลเปสไว้ในเซลล์ก่อนและจะขับออกนอกเซลล์เมื่อมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ไลเปสที่ถูกนำมาใช้ในทางการค้าส่วนใหญ่เป็นประเภทขับออกนอกเซลล์ ทั้งนี้เนื่องจากง่ายต่อการผลิต การเก็บเกี่ยว และเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิต เพราะสามารถผลิตได้ปริมาณมากคราวเดียว ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไลเปสของจุลินทรีย์ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน สภาพความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ และความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในอาหารเลี้ยงเชื้อในระหว่างการผลิต

ตาราง 8 จุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ทางการค้าบางส่วน

แบคทีเรีย	รา	ยีสต์
Achromobacter sp.	*Abida corymbifera*	*Candida sp.*
Achromobact lipolyticus	*Abida hyalospora*	*Candida rugosa*
Bacillus cereus	*Aspergillus awamori*	*Candida cylindracea*
Bacillus megaterium	*Aspergillus niger*	*Candida antarcea*
Bacillus laterosporus	*Aspergillus oryzae*	*Candida lipolitica*

ที่มา: ณกัญภัทร จินดา. (2547, กันยายน-ธันวาคม). เอนไซม์ไลเปส I : แหล่งและประโยชน์ระดับอุตสาหกรรม. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.* 24(3): 25-26.

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ (Physico-Chemicals Properties)

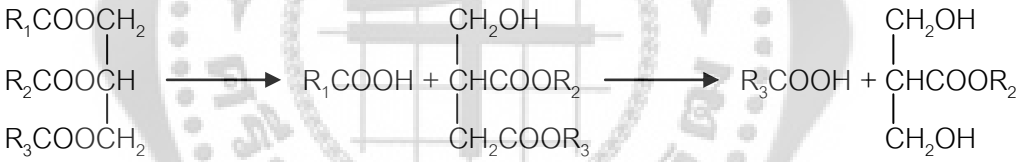
โดยทั่วไปแล้วไลเปสละลายได้ดีในน้ำ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ไลเปสจากจุลินทรีย์โดยทั่วไปทำงานได้ดีในช่วง pH 5.6-8.5 และมีความคงตัวสูงในช่วง pH เป็นกลาง ไลเปสส่วนใหญ่ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส และไลเปสจากจุลินทรีย์มีความ

คงตัวต่ออุณหภูมิสูงกว่าไลเปสจากพืชและสัตว์ มีความคงทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ ในการทำงานไม่ต้องการโคแฟคเตอร์ มีความจำเพาะต่อสับสเตรทหลายชนิด มี enantioselectivity สูง

สิริรุ่ง วงศ์สกุล. (2546: 22) ไลเปสแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามความจำเพาะต่อสับสเตรท เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้ในปฏิกิริยา Transesterification ได้แก่

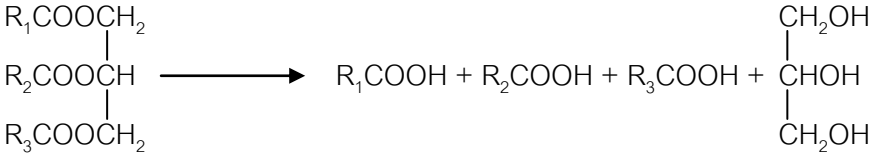
1. ความจำเพาะต่อกรดไขมัน (Group specific) ไลเปสมีระดับของความจำเพาะต่อกรดไขมัน เช่น ไลเปสจาก *Candida Antarctica* จะมีความจำเพาะต่อกรดไขมันสายโซ่สั้นมากกว่าสายโซ่ยาว ไลเปสจาก *Geotrichum candidum* จะย่อยสลายกรดไขมันที่มีพันธะคู่ในตำแหน่งที่ 9 บนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ได้ดี

2. ความจำเพาะต่อตำแหน่ง (Position specific) ซึ่งไลเปสโดยทั่วไปมักมีความจำเพาะต่อตำแหน่ง โดยเฉพาะต่อตำแหน่งที่ 1 และ 3 (1,3-specific lipase) บนโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ จะเร่งย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ตรงตำแหน่งที่ 1 และ 3 ในโมเลกุลน้ำมันได้สมบูรณ์จะได้กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ส่วนตำแหน่งที่ 2 ไม่เกิดการย่อยสลาย เอนไซม์กลุ่มนี้มักถูกนำไปใช้เร่งปฏิกิริยากับสับสเตรทที่เป็นแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (Primary alcohol) เอนไซม์กลุ่มนี้ส่วนใหญ่ได้จากแบคทีเรีย เช่น *Pseudomonas sp.*, *Bacillus thermocatenulatue*



ภาพประกอบ 23 การเร่งย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ตรงตำแหน่งที่ 1 และ 3 ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

3. ไม่มีความจำเพาะเจาะจงต่อตำแหน่ง (Non-Position specific) หมายถึง ไลเปสที่เข้าทำปฏิกิริยากับไขมันได้อย่างไม่เจาะจง จะเป็นตำแหน่งที่ 1, 2 หรือ 3 ของไตรกลีเซอไรด์ก็ได้ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปแบบสุ่ม จะย่อยไตรกลีเซอไรด์ได้อย่างสมบูรณ์ จะได้กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล เอนไซม์กลุ่มนี้ได้จาก *Candida rugosa*, *Candida cylindracae* และ*Pseudomanas fluorescens*



ภาพประกอบ 24 การเร่งย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ตรงตำแหน่งที่ 1, 2 หรือ 3 ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

แร่ดินเหนียว (Clay Minerals)

แร่ (Mineral) คือ ธาตุหรือสารประกอบทางเคมีของอนินทรียสารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติจากกระบวนการอนินทรีย์ โดยที่มีส่วนประกอบทางเคมีและอยู่ในสภาพของแข็งเป็นรูปผลึก (Crystal) ซึ่งมีลักษณะการเกิดของระบบผลึก (Crystal system) ที่ค่อนข้างจะแน่นอน ยกเว้นแร่บางชนิดพบว่าไม่มีรูปแบบผลึกที่แน่นอน เรียกว่า แร่ที่ไม่รูปผลึก (Mineraloid) เป็นอสัณฐาน (Amorphous) (สง่า ตั้งชวาล. 2523: 1)

การจำแนกแร่ตามการกำเนิด (สง่า ตั้งชวาล. 2549: 102-103)

แร่แบ่งตามการกำเนิด (Original) ออกเป็น 2 ชนิด คือ แร่ปฐมภูมิกับแร่ทุติยภูมิ

1. **แร่ปฐมภูมิ** (Primary Minerals)

แร่ปฐมภูมิ หมายถึง แร่ที่กำเนิดโดยตรงครั้งแรกจากสารหลอมเหลวหรือจากสารละลาย ได้แร่ที่เกิดจากการเย็นตัวของหินหนืด แร่ที่ตกผลึกจากสารละลายตกตะกอนอยู่ในหิน แร่ปฐมภูมิมีผลึกและโครงสร้างที่แน่นอน

แร่ปฐมภูมิที่สำคัญส่วนใหญ่จะเป็นแร่ซิลิเกต โดยเป็นแร่ประกอบหินที่อยู่ในหินอัคนีเป็นส่วนใหญ่ และมีบางชนิดที่เป็นแร่ประกอบหินในหินตะกอน แต่มีจำนวนไม่มาก โดยในดินมักพบแร่ปฐมภูมิมากในอนุภาคขนาดทราย (Sand) และทรายแป้ง (Silt)

ตัวอย่างของแร่ปฐมภูมิคือ แร่โอลิวีน ควอตซ์ ไมกา เฟลด์สปาร์ กลุ่มแร่ไพรอกซีน (Pyroxene group) กลุ่มแร่แอมฟิโบล (Amphibole group) แร่แคลไซต์ที่ตกผลึกจากสารละลาย

2. **แร่ทุติยภูมิ** (Secondary Minerals)

แร่ทุติยภูมิ หมายถึง แร่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง (Alteration) การสลายตัว (Decomposition) ภาวะแปรสภาพ (Metamorphism) ทางกายภาพ เคมี และชีวภาพจากแร่ปฐมภูมิ ปกติการเปลี่ยนแปลงและการสลายตัวนี้มักจะเกิดที่อุณหภูมิและความดันปกติ แต่การเกิดภาวะแปรสภาพจะเกิดที่อุณหภูมิและความดันสูง

แร่ทุติยภูมิส่วนใหญ่เป็นแร่ที่เกิดจากแร่ปฐมภูมิพบมากในหินตะกอนและหินแปร โดยในดินมักพบแร่ทุติยภูมิมากในอนุภาคขนาดดินเหนียว (Clay) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548: 9)

ตัวอย่างของแร่ทุติยภูมิ คือ แร่แอนไฮไดรต์ที่เปลี่ยนแปลงมาจากแร่ยิปซัม แร่ดินเหนียวที่เกิดจากการผุผังของแร่เฟลด์สปาร์และไมกา แร่การ์เนตและแร่ทัลก์ที่เกิดจากภาวะแปรสภาพจากแร่เดิมในหินอัคนี

คอลลอยด์ดิน เป็นส่วนประกอบที่เป็นของแข็งที่มีขนาดของอนุภาคเล็กมาก แขวนลอยอยู่ในของเหลว (น้ำ) หรือในอากาศ ในดิน แบ่งเป็น 2 พวก คือ

1. คอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic colloid) คือส่วนที่หลงเหลืออยู่หลังจากเศษพืชและซากสัตว์ถูกย่อยสลายแล้ว และส่วนที่หลงเหลืออยู่นี้จะคงทนต่อการสลายตัวได้ช้ามาก ซึ่งเรียกว่า ฮิวมัส (Humus)

2. คอลลอยด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic colloid) คือส่วนที่ได้จากการสลายตัวของแร่ธาตุ ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออนและอนุมูลต่างๆ และส่วนที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้อาจตกผลึกหรือทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่ เป็นผลึกบางๆ มีขนาดเล็กมาก เรียกว่า แร่ดินเหนียว (Clay mineral) (ดุสิต จิตตนูนท์. 2546: 86)

แร่ดินเหนียวโดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นพวกไฮดรัสอลูมินัมซิลิเกต (Hydrous aluminum silicates) และมีไอออนของเหล็ก (Fe), แมกนีเซียม (Mg) กับรูปแบบแร่ธาตุด่าง (Alkaline minerals) ได้แก่ แคลเซียม (Ca), โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ประกอบอยู่ด้วย มีขนาดของอนุภาคน้อยกว่า 2 ไมครอน ซึ่งมีความสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน เนื่องจากมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และประจุทางไฟฟ้าสูง ซึ่งโครงสร้างและองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวสามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ เช่น เครื่อง X-ray diffraction และเครื่อง scanning electron (จินตนา สุวรรณรัตน์. 2549: 37)

แร่ดินเหนียวจัดเป็นแร่ในกลุ่มฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicates) รูปลักษณะแร่ธาตุส่วนใหญ่เป็นผลึก (Crystalline) เป็นแผ่น (Sheetlike) หรือเป็นโครงสร้างเรียงชั้น (Layer) (สถาพร คูวิจิตร. 2542: 2-12)

แร่ดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม (Ion and Aluminum Oxides and Hydroxide) เป็นแร่ดินเหนียวที่มีความสามารถในการดูดยึดไอออนได้น้อย

2. ซิลิเกตเคลย์ หรือ อะลูมิโนซิลิเกต มินเนอรัล (Silicate clay หรือ Alumino silicate mineral) ซึ่งเป็นสารคอลลอยด์ที่มีอยู่ในดินมากที่สุด การที่เรียกว่า ซิลิเกตเคลย์ หรืออะลูมิโนซิลิเกตมินเนอรัลนั้นก็เนื่องจากโครงสร้างของแร่ดินเหนียวชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่น (หรือชั้น) โครงสร้างพื้นฐาน 2ชนิดคือ แผ่นซิลิกา (Silica sheet) หรือแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรัล (Silica tetrahedral sheet) และแผ่นอะลูมินา (Alumina sheet) หรือแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรัล (Alumina octahedral sheet) (ดุสิต จิตตนูนท์. 2546: 86)

แผ่นซิลิกา (Silica sheet) หรือแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรัล (Silica tetrahedral sheet) ประกอบด้วยอะตอมซิลิคอนเชื่อมเป็นระยะทางเท่ากันกับออกซิเจน 4 ตัว (หรืออาจจะเป็น OH ใน

กรณีที่จะต้องทำให้โครงสร้างสมดุล) โดยเชื่อมกันเป็นรูปที่มี 4 ด้าน (Tetrahedron) มีอะตอมของซิลิคอนอยู่ตรงกลาง เรียกว่า Silica tetrahedral unit ถ้าแต่ละ unit มาต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (ใช้ 6 Tetrahedral unit) จะเกิดเป็นแผ่น (Sheet) ที่มีองค์ประกอบเป็น $Si_4O_6(OH)_4$ ดังภาพประกอบ 25 การจัดเรียงตัวของ unit เหล่านี้จะมียอดชี้ไปในทิศทางเดียวกัน และฐานของแผ่นอยู่ในระนาบเดียวกัน เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ Silica tetrahedral sheet จะเห็นว่าประกอบด้วย 1) ระนาบฐานเป็นออกซิเจน 2) ระนาบของอะตอมซิลิคอน ซึ่งแต่ละตัวจะอยู่บริเวณช่องว่างที่เป็นรอยเชื่อมต่อระหว่างออกซิเจน 3 ตัว เพราะฉะนั้นซิลิคอนจะเรียงในลักษณะหกเหลี่ยม และ 3) เป็นระนาบของอะตอมไฮดรอกซิล ซึ่งไฮดรอกซิลแต่ละตัวจะอยู่เหนืออะตอมซิลิคอนและอยู่ปลายของ Tetrahedron ซึ่งเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับ Octahedral sheet ระยะทางระหว่าง O – O มีค่า 2.55 °A และช่องว่างสำหรับไอออนใน Tetrahedral coordination ประมาณ 0.55 °A ความหนาของ unit ที่สมบูรณ์ (ปกติ) ในโครงสร้างแร่ดินเหนียว

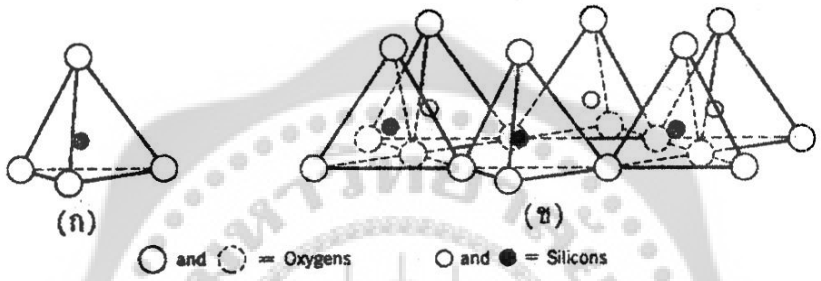
แผ่นอะลูมินา (Alumina sheet) หรือแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรัล (Alumina octahedral sheet) ประกอบด้วยชั้นของอะตอมออกซิเจน หรือกลุ่มของไฮดรอกซิล 2 ชั้น โดยมีอะลูมิเนียม แมกนีเซียม หรือเหล็ก อยู่ตรงกลางในลักษณะ Six-Fold coordination หรือ Octahedral coordination เรียกหน่วยที่ได้นี้ว่า Octahedral unit ไอออนบวกเหล่านี้จะอยู่ห่างจากอะตอมออกซิเจนหรือไฮดรอกซิลเป็นระยะทางเท่าๆ กัน ดังภาพประกอบ 26 Octahedron หลายอันเชื่อมต่อกันในแนวนอน โดยเชื่อมตามบริเวณขอบของหน่วยเกิดเป็น Octahedral sheet หน่วยโครงสร้างที่เล็กที่สุดจะมี Octahedron 3 หน่วย ถ้าภายในชั้นมี Al^{3+} ไอออนบวกนี้ก็จะอยู่เฉพาะสองในสามของตำแหน่งในช่องว่างของ Octahedral เพื่อทำให้โครงสร้างสมดุล ซึ่งเป็นโครงสร้างกิบบ์ไซต์ (Gibbsite) มีสูตร $Al_2(OH)_6$ ซึ่งจัดเป็นพวก Dioctahedral แต่ถ้าเป็น Mg^{2+} จะอยู่เต็มทุกตำแหน่งใน Octahedral เพื่อให้โครงสร้างสมดุล ก็จะได้โครงสร้างของแร่บรูไซต์มีสูตร $Mg_3(OH)_6$ จัดเป็นพวก Trioctahedral ระยะทางระหว่าง O – O มีค่า 2.60 °A และ OH – OH มีค่า 2.94 °A ความหนาของหน่วย Octahedral ในโครงสร้างแร่ดินเหนียวตามทฤษฎีมีค่า 5.05 °A

แผ่น Tetrahedral และ Octahedral เป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานของแร่ดินเหนียวซิลิเกต การเชื่อมกันของโครงสร้างพื้นฐานนี้ทำให้เกิดเป็นชั้น (Layer) ในผลึกของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด ชั้นเหล่านี้จะแยกจากกันโดย Interlayer ซึ่งน้ำหรือไอออนบวกอื่นๆ สามารถถูกดูดซับอยู่ใน Interlayer นี้ได้ (ในแร่ดินเหนียวบางชนิด)

ในผลึกหรือ Micelle ชนิดหนึ่งๆ จะประกอบด้วยชั้นหลายชั้น ดังภาพประกอบ 27 (ก) ถ้า Tetrahedral หนึ่งแผ่นรวมกับ Octahedral หนึ่งแผ่น เกิดเป็นชั้นที่เรียกว่า 1:1 layer การเชื่อมกันแบบนี้ทำให้ส่วนบนสุดเป็นแผ่น Octahedral ที่มีกลุ่มเฉพาะ OH

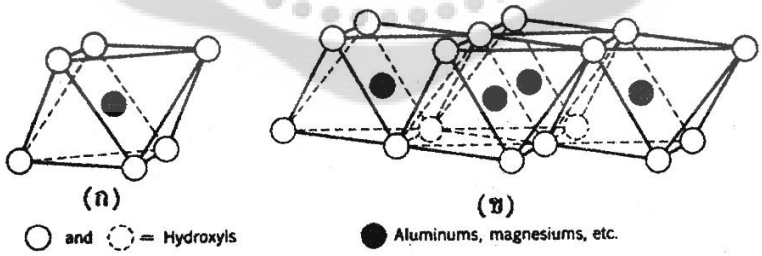
ถ้าการเชื่อมกันเกิดจากแผ่น Tetrahedral สองแผ่นรวมกับแผ่น Octahedral หนึ่งแผ่น เกิดเป็นชั้นที่เรียกว่า 2:1 layer เพื่อให้การเชื่อมแบบนี้สมบูรณ์ แผ่น Tetrahedral อันบนจะชี้ลงด้านล่าง นั่นก็คือออกซิเจนที่ยอดของ Tetrahedral ชี้ลงและเชื่อมกับแผ่น Octahedral ดังภาพประกอบ 27 (ก) ไอออนลบของระนาบ Octahedral ก็จะมีทั้ง O และ OH

ถ้าประจุในชั้น 1:1 และ 2:1 ไม่เป็นกลางประจุที่เกินจะอยู่ในตำแหน่ง Interlayer เพื่อให้โครงสร้างเป็นกลาง การรวมกันของชั้นและ Interlayer เรียกว่า หน่วยโครงสร้าง (Structural unit) โดยที่ในหนึ่งหน่วยโครงสร้างอาจจะมีหนึ่งหรือมากกว่าหน่วยสูตรทางเคมี (Chemical formula unit) ดังภาพประกอบ 27 (ข)



ภาพประกอบ 25 (ก) Tetrahedron หนึ่งหน่วย
(ข) โครงสร้างเป็นแผ่นที่เกิดจาก Tetrahedron หกหน่วยมาจับกันเป็นรูปหกเหลี่ยม เกิดเป็นแผ่น Tetrahedral

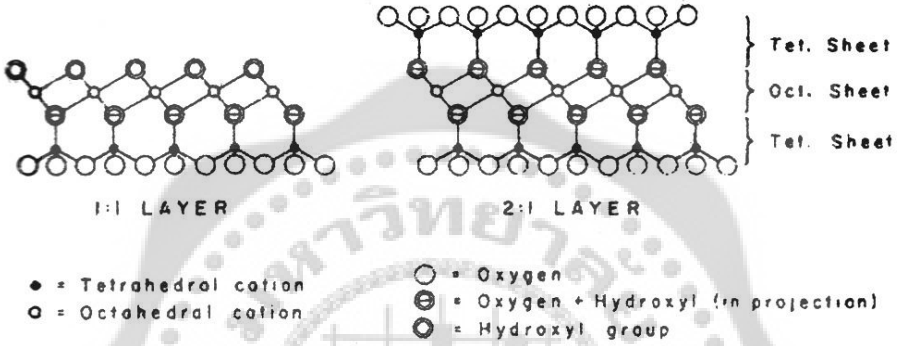
ที่มา: อัญชลี สุทธิประการ. (2534). *แร่ในดิน : แร่ดินเหนียวและเทคนิคการวิเคราะห์ เล่ม 2.* หน้า 306.



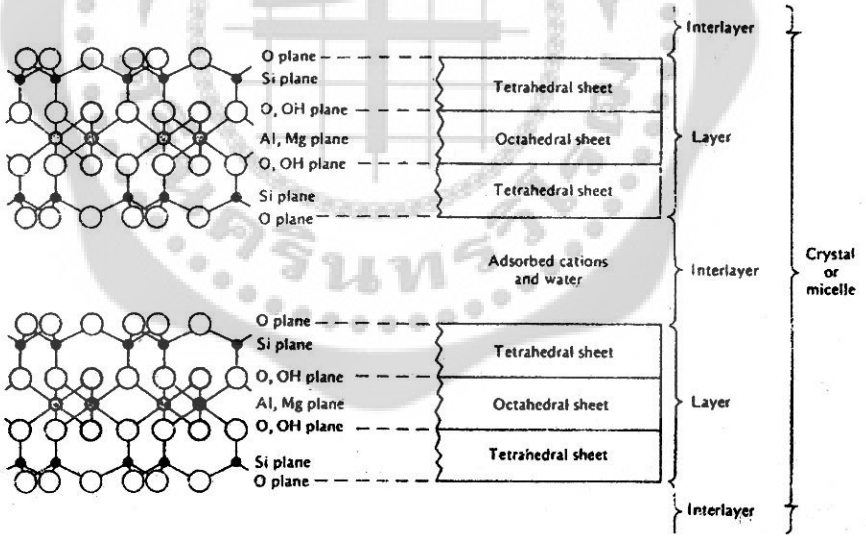
ภาพประกอบ 26 (ก) Octahedron หนึ่งหน่วย
(ข) โครงสร้างเป็นแผ่นที่เกิดจาก Octahedron สี่หน่วยมาจับกันเกิดเป็นแผ่น Octahedral

ที่มา: อัญชลี สุทธิประการ. (2534). *แร่ในดิน : แร่ดินเหนียวและเทคนิคการวิเคราะห์ เล่ม 2.* หน้า 306.

ในแร่ดินเหนียวบางชนิดฟลูออรีน (F) อาจแทนที่ OH และไอออนบวกในตำแหน่ง Octahedral นอกจากจะเป็น Mg^{2+}, Al^{3+}, Fe^{2+} และ Fe^{3+} แล้ว อาจจะมีไอออนบวกขนาดปานกลางชนิดอื่นก็ได้ เช่น Li, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu และZn ทั้งนี้เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนกัน โดยกระบวนการที่เรียกว่า Isomorphous substitution ซึ่งเกิดมากในดิน ทำให้สูตรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวยุ่งยากซับซ้อนขึ้นไปอีก โดยที่ Si ในแผ่น Tetrahedral และ Al^{3+} กับ Mg^{2+} ในแผ่น Octahedral จะถูกแทนที่ด้วยไอออนบวกที่กล่าวมาแล้วและมีขนาดเท่าๆ กัน (อัญชลี สุทธิประการ. 2534: 304-306)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 27 (ก) การเชื่อมของแผ่น Octahedral และ Tetrahedral เกิดเป็นชั้นแบบ 1:1 และ 1:2

(ข) แสดงองค์ประกอบพื้นฐานในผลึกของแร่ดินเหนียว

ที่มา: อัญชลี สุทธิประการ. (2534). *แร่ในดิน : แร่ดินเหนียวและเทคนิคการวิเคราะห์ เล่ม 2*. หน้า 307.

ดุสิต จิตตนูนท์ (2546: 86-87) ซิลิเกตเคลย์ยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดย่อยได้อีก 4 ประเภท คือ

1. อัลโลเฟน (Allophane) คือ ซิลิเกตเคลย์ที่ไม่มีโครงสร้างหรือส่วนประกอบที่แน่นอน

2. ไดอะมอร์ฟิก มินเนอรัล หรือ แร่ดินเหนียวชนิด 1:1 (Diamorphic mineral หรือ 1:1 Type mineral) ซิลิเกตเคลย์ชนิดนี้เป็นชนิดที่โครงสร้างพื้นฐาน 1 หน่วยจะประกอบด้วย 2 ชั้นคือ มีแผ่นซิลิกา 1 แผ่นซ้อนทับอยู่บนแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น โครงสร้างพื้นฐานแต่ละหน่วยซึ่งประกอบด้วย 2 ชั้นนี้จะซ้อนทับกันอย่างแนบสนิทไม่มีช่องว่างให้ไอออนจากภายนอกแทรกเข้ามาได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบนพื้นที่ผิวภายนอกของซิลิเกตเคลย์ชนิดนี้มีประจุไฟฟ้าลบอยู่พอสมควร จึงดูดยึดไอออนบวกไว้บนผิวภายนอกได้ ซิลิเกตที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ฮอลลอยไซด์ (Holloysite) และดิคไคต์ (Dickite) เป็นต้น

3. ไตรมอร์ฟิกมินเนอรัล หรือแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 (Trimophic mineral หรือ 2:1 Type mineral) ซิลิเกตเคลย์ชนิดนี้โครงสร้างพื้นฐาน 1 หน่วยจะประกอบด้วย 3 ชั้น คือ มีแผ่นซิลิกา 2 แผ่นประกบแผ่นอะลูมินา 1 แผ่นไว้ระหว่างกลาง และบนผิวภายนอกของแต่ละหน่วยจะมีประจุไฟฟ้าลบอยู่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานแต่ละหน่วยจะซ้อนกันไม่สนิท มีช่องว่างให้ไอออนบวกบางชนิดแทรกเข้าไปได้ จึงสามารถดูดยึดไอออนบวกไว้ได้มากทั้งบนผิวภายนอกและในช่องว่างของแต่ละหน่วย ซิลิเกตเคลย์ที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) อิลไลต์ (Illite) เวอร์มิคิวไลต์ (Vermiculite) เป็นต้น

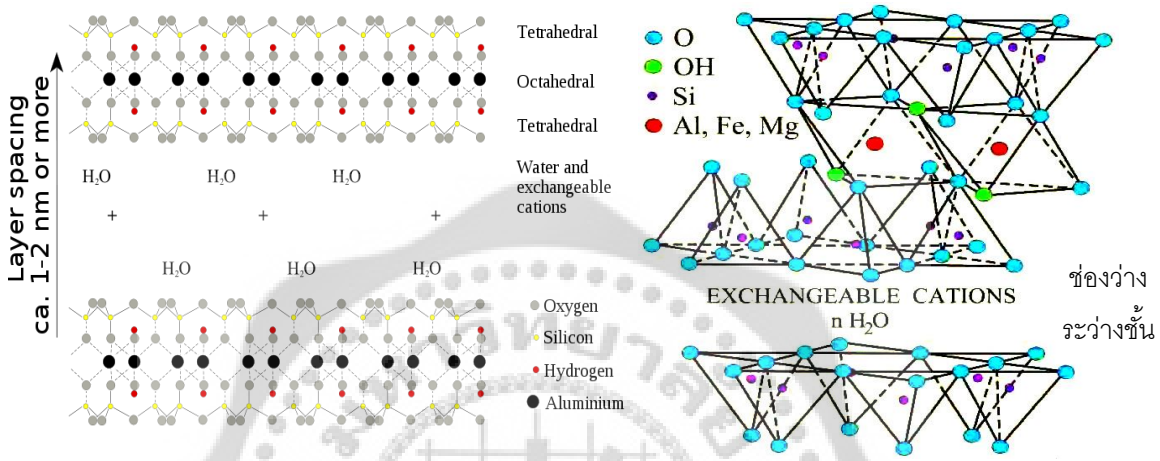
4. เตตระมอร์ฟิกมินเนอรัล หรือแร่ดินเหนียวชนิด 2:1:1 (Tetramorphic mineral หรือ 2:1:1 Type mineral) ซิลิเกตเคลย์ในกลุ่มนี้มีโครงสร้างพื้นฐานแต่ละหน่วยจะประกอบด้วย 4 ชั้น คือ มีแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ประกบแผ่นอะลูมินาไว้ตรงกลางเหมือนไตรมอร์ฟิกมินเนอรัล แล้วยังมีชั้นที่ 4 คือ แผ่นอะลูมินา เหล็ก หรือแมกนีเซียมออกตะฮีดรัล (Al, Fe, Mg Octahedral sheet) ประกอบอีกชั้นหนึ่งซิลิเกตเคลย์ชนิดนี้แต่ละหน่วยจะซ้อนกันแนบสนิทเช่นกันจึงดูดยึดไอออนบวกต่างๆ ไว้ได้ไม่มากนัก ซิลิเกตเคลย์ที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) บรูไซต์ (Brucite) เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

เป็นแร่ที่มีรูปผลึกระบบโมโนคลินิก (Monoclinic system) เกิดเป็นผลึกแผ่นบางๆ (Flaky crystal) มีสูตรเคมีเป็น $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$ เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นของแผ่นอะลูมิเนียม โดยชั้นกลางเป็นชั้นของอะลูมินาที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้น

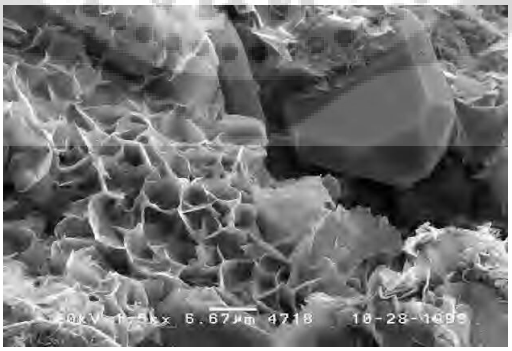
ซิลิกา แต่ละชั้นมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่าความหนา 200 เท่า ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่า Gallery (อัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ์ และ อาจารี อัศวดิลกฤทธิ์. 2550: 10) พื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) จะมีประจุเป็นลบ ในช่องว่างจะมีประจุบวกโซเดียมหรือแคลเซียมเพื่อทำหน้าที่ยึดชั้นของแร่เอาไว้ และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุได้ (มัทนา ธิติศักดิ์; และ จิตติโสภา สุจิตต์. 2546: 6) ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ลักษณะโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

ที่มา: Wikipedia, the free encyclopedia. (2009). *Montmorillonite*. Retrieved March 12, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite

ที่มา: David MogK. (2009). *Teaching Clay Mineralogy*. Retrieved March 12, 2009, from http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/clay_mineralogy.html



ภาพประกอบ 29 แร่มอนต์มอริลโลไนต์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope)

ที่มา: *Montmorillonite Mineral Data*. (2009). Retrieved March 12, 2009, from http://webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml

แร่มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Ca-montmorillonite : $Ca_{0.5}(Mg,Al)_3Si_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$) หรือเป็นโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Ca-montmorillonite : $Na_{0.5}(Mg,Al)_3Si_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$) ทั้งนี้เพราะอัลคาไลมีการแทนที่กันได้ เรียกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นเบส (base exchange) โดยโซเดียมเข้าไปแทนที่แคลเซียม นอกจากนี้ในโครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ยังมีการแทนที่ด้วยแมกนีเซียม (สง่า ตั้งชวาล. 2523: 196-197)

คุณสมบัติทั่วไปของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (*Montmorillonite Mineral Data*. 2009: Online)

สูตรทางเคมี (Chemical Formula) $(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.n(H_2O)$

มวลโลกุล (molecular) 549.07 gm

องค์ประกอบ (Composition)

0.84 % Na	1.13 % Na_2O	0.73 % Ca	1.02 % CaO
9.83 % Al	18.57 % Al_2O_3	20.46 % Si	43.77 % SiO_2
4.04 % H	36.09 % H_2O	64.11 % O	

สูตรทั่วไป (Empirical Formula) $Na_{0.2}Ca_{0.1}Al_2Si_4O_{10}(OH)_2.10H_2O$

คำเหมือน (Synonym) เบนโทไนต์ (Bentonite)

ระบบผลึก (Crystal System) โมโนคลินิก (Monoclinic system)

อัตราส่วนของความยาวแกน (Axial Ratios) a:b:c = 0.5782:1:1.1129

สี (Color) ขาว, ขาวเทา, เหลือง, เหลืองแกมน้ำตาล และเหลืองแกมเขียว

รอยแตกในแร่ (Cleavage) เห็นได้ชัดเจน สมบูรณ์

ความถ่วงจำเพาะ (Density) 2-2.7, ค่าเฉลี่ย = 2.35

ความแข็ง (Hardness) 1.5-2-ทัลค์-ยิปซัม

ความโปร่ง (Diaphaniety) โปร่งแสง-ทึบแสง

ความวาว (Luster) ด้าน ทึบ

การเปล่งแสง (Luminescence) ไม่มี

สมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

1. โดยธรรมชาติจะมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic)

2. รูปร่างและขนาด อนุภาคค่อนข้างเล็ก ขนาดประมาณ 0.01-1.0 ไมโครเมตร เพราะผุพังสลายตัวง่าย เนื่องโครงสร้างผลึกไม่แข็งแรง ทำให้รูปร่างไม่เป็นรูปทรงชัดเจน

3. พื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากแร่ชนิดนี้มักจะมีขนาดเล็ก และในช่องว่างมี Cation เข้าออกได้ง่ายเหมือนกับว่าในโครงสร้างมีพื้นที่ผิวภายใน ซึ่งเป็นที่อยู่ของ Exchangeable cation ด้วย ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง

4. การเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติก แร่ชนิดนี้มีอนุภาคขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสกับอนุภาคอื่นมีมาก ทำให้ค่อนข้างเหนียวติดมือ ลื่นมือเกิดเฉพาะเมื่อเปียกหรือมีน้ำอยู่

5. การขยายตัวและการหดตัว แร่ชนิดนี้มีช่องว่างระหว่างชั้นหดและขยายตัวได้มาก ขยายตัวได้ระหว่าง 0.96-1.80 นาโนเมตร เมื่อเปียก เนื่องจากมีแรงยึดระหว่างหน่วยผลึกน้อย (Van der waals bonding or O – O linkage) โมเลกุลน้ำ และ Hydrate cation ต่างๆ เข้าออกได้มาก ดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิดนี้เมื่อปล่อยให้แห้งนานๆ จะเกิดรอยแตกระแหงที่กว้างและลึก

6. ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (CEC) แร่ชนิดนี้มีค่า CEC สูง เนื่องจากมีประจุลบในโครงสร้างมาก และพื้นที่ผิวสัมผัสมากจากการที่มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวภายในซึ่งเป็นที่อยู่ของ cation ที่สามารถออกมาแลกเปลี่ยนได้ด้วย นอกเหนือจากประจุ Na^{+}, Ca^{2+} และ Mg^{2+} ยังมีการแลกเปลี่ยนกับไอออนของสารอินทรีย์ได้

ตาราง 9 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของแร่ดินเหนียวซิลิเกตที่สำคัญๆ สามชนิด

คุณสมบัติ	แร่มอนต์มอริลโลไนต์	แร่อิลไลต์	แร่เคโอลิไนต์
ขนาด (μm)	0.01-1.0	0.1-2.0	0.1-5.0
รูปร่าง	เป็นแผ่นบางๆ ไม่สม่ำเสมอ	เป็นแผ่นบางๆ ไม่สม่ำเสมอ	เป็นแผ่นบางๆ รูปหกเหลี่ยม
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	700-800	100-120	5-20
พื้นผิวภายนอก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
พื้นผิวภายใน	สูงมาก	ต่ำ	ไม่มี
การเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การขยายตัวและการหดตัว	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (me./100 gm.)	80-120	15-40	3-10

ที่มา: อัญชลี สุทธิประการ. 2534: 317; อ้างอิงจาก Brady: 1984.

อันตรกิริยาของดินเหนียวกับสารอินทรีย์ (Clay-Organic matter interactions) (จินตนา สุวรรณรัตน์. 2549: 100-104)

ถ้าสารอินทรีย์มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงต่ำ น้อยกว่า 1000 ถึงน้ำหนักมากคือมากกว่า 100,000 เนื่องจากการเกิดขั้วของประจุบนดินเหนียวที่ค่า pH ต่ำกว่า pH 7 จะทำให้สารอินทรีย์ประจุบวกถูกดูดซับบนผิวหน้าแนวระนาบ (Planar faces) และสารอินทรีย์ประจุลบจะถูกดูดซับบนริมของดินเหนียว ยกเว้นสารอินทรีย์ประจุลบโมเลกุลเล็กๆ สามารถที่จะเกิดการเชื่อมต่อกับประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้บนส่วนของผิวหน้าของรอยแตก (Cleavage faces) สำหรับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ จะเกิดอันตรกิริยากับผิวหน้าผ่านหมู่ที่มีขั้วบนโมเลกุล และแรงแวนเดอร์วาวล์

อันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างสารอินทรีย์กับดินเหนียว (Electrostatic interactions) แบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท

1. **ประเภทสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก** (Cationic compounds)

สารอินทรีย์ประจุบวกหลายชนิดเกิดขึ้นโดยการถูกเพิ่มไฮโดรเจนไอออน (Protonated H^+) เข้าไปในโมเลกุลของหมู่เอมีน เช่น อัลคิลเอมีน ($R\text{-}NH_2$) และกรดอะมิโน ($RCHNH_2COOH$) กระบวนการโปรโทเนชัน (Protonation) จะเกิดได้ดีมากขึ้นเมื่อสภาวะเป็นกรดถูกทำให้มากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบประจุบวกซึ่งถูกดูดซับอยู่บนผิวของดินเหนียว

การดูดซับสารอินทรีย์ประจุบวกจะเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกของผิวดินเหนียวประเภท 2:1 โดยประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่ (Chain length) สารอินทรีย์ เนื่องมาจากแรงแวนเดอร์วาวล์ระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ดังนั้นการดูดซับที่เกิดขึ้นจะมากกว่าค่า CEC ที่ดินเหนียวมีอยู่ สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่ถูกดูดซับบนผิวดินเหนียว เช่น โปรตีน จะถูกดูดซับอยู่ที่ส่วนของ Interlayer ดังนั้นจึงทำให้โปรตีนหลีกเลี่ยงการถูกทำลายจากจุลินทรีย์ได้มากขึ้น

2. **ประเภทสารอินทรีย์ที่มีประจุลบ** (Anionic compounds)

สารประกอบอินทรีย์จะถูกดูดซับ เนื่องจากการดึงดูดระหว่างหมู่ฟังก์ชันนัล $-COO^-$ กับตำแหน่งประจุบวกบนริมหน้าดินเหนียว หรือผิวของออกไซด์ นอกจากนี้หมู่คาร์บอกซิลสามารถเกิดการปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับ OH และ OH_2^+ ของดิน

3. **สารประกอบที่ไม่ประจุแต่มีขั้ว** (Nonionic compounds)

สารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น แอลกอฮอล์ น้ำตาล และโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (Oligosaccharides) จะไม่ถูกดูดซับ เมื่อมีการแข่งขันกับโมเลกุลของน้ำ ยกเว้นถ้าโมเลกุลของสารอินทรีย์เหล่านี้มีความเข้มข้นสูงในน้ำ สารประกอบที่มีขั้วสูงสามารถเกิดอันตรกิริยากับผิวดิน ส่วนแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) และพอลิแซคคาร์

ไรด์ (Polysaccharide) จะถูกดูดซับได้อย่างแข็งแรงที่ผิวของดินเหนียว ถึงแม้ว่าจะมีการแข่งขันกับโมเลกุลของน้ำก็ตาม แรงดึงดูดที่ปรากฏส่วนหนึ่งเกิดผ่านพันธะไฮโดรเจนไปยัง O และหมู่ OH ที่ผิวดินเหนียว และส่วนหนึ่งเกิดผ่านแรงแวนเดอร์วาวล์ที่ไม่จำเพาะเจาะจง การเกิดพลังงานการดูดซับจำนวนมาก อาจมาจากการเพิ่มขึ้นของความไม่เป็นระเบียบ เมื่อสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เข้าไปแทนที่น้ำหลายๆ โมเลกุลที่ผิวอนุภาคดิน ซึ่งความไม่เป็นระเบียบนี้จะเพิ่มความเสถียรของโมเลกุลสารอินทรีย์ให้เกิดมากขึ้นเมื่อถูกดูดซับ

การใช้ประโยชน์ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

1. เนื่องจากแร่มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นส่วนผสมหลักที่อยู่ในดินเบนโทไนต์ (Bentonite) มีคุณสมบัติพิเศษในการบวมตัว (Swell) หลายเท่าตัว เมื่อนำผสมน้ำ มีค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) สูงกว่าร้อยละ 500 ทำให้มีคุณสมบัติพิเศษนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรม เช่น ผสมน้ำนำไปอัด (Grout) ในชั้นดินใต้ฐานเขื่อนให้ทึบน้ำ นำมาผสมน้ำเป็นน้ำโคลนเจาะดิน (Mud slurry) เจาะบ่อบาดาล เจาะบ่อน้ำมัน เจาะเสาเข็มเจาะ (Bored pile) เจาะกำแพงพืด (Diaphragm wall) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของน้ำโคลนเบนโทไนต์ (Bentonite) จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำเล็กน้อย และจะเคลือบผนังบ่อดิน (ทราย) ไม่ให้น้ำซึมออกจากบ่อดินได้เร็วสามารถเวียนน้ำโคลนกลับมาใช้ใหม่ได้และน้ำโคลนจะทำให้เกิดแรงดันทดแทนดินที่ขุดออกไปจากหลุมดันผนังไม่ให้ดินพังในขณะที่ใช้เครื่องมือขุดเจาะลงไปสามารถทำงานใต้ระดับน้ำโคลนได้ตามปกติ เทคอนกรีตได้ด้วยวิธีเทใต้น้ำ (Trimie) (สถาพร คูวิจิตร. 2542: 2-16)

2. ใช้เป็นสารฟอกสีหรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์

3. การนำไปดัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้เป็นแอคติเวดเคลย์ (Activated clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ทรรศพร พิศรูป. 2548: 12)

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์** เป็นสารที่นำมาใส่ในปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราของปฏิกิริยาเคมี และสามารถนำกลับออกมาได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากที่สิ้นสุดปฏิกิริยา เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เนื่องจากนำมาตรึงบนตัวพยุง จึงเรียกว่าเอนไซม์ตรึงรูป (Immobilized enzyme) องค์ประกอบที่สำคัญ 3 อย่างในการตรึงเอนไซม์คือ เอนไซม์ ตัวพยุงในการตรึง และวิธีการตรึง ในที่นี้เอนไซม์ที่ใช้คือ เอนไซม์ไลเปส แหล่งผลิตที่สำคัญได้แก่ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ในทางการค้าส่วนใหญ่ผลิตได้จากจุลินทรีย์ (แบคทีเรีย ราและยีสต์) มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ คือ ละลายได้ดีในน้ำ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ทำงานได้ในช่วง pH 5.6-8.5 ช่วงอุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในน้ำมัน เมื่อย่อยสลายสมบูรณ์จะได้ผลผลิตเป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ เกิดใน

ระบบที่มีน้ำน้อยหรือในระบบของตัวทำละลายอินทรีย์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เอนไซม์ไลเปสที่ผลิตจากยีสต์ สายพันธุ์ *Candida rugosa* โดยที่เอนไซม์ไลเปสชนิดนี้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไขมันได้อย่างไม่เจาะจงตำแหน่ง ทั้งตำแหน่งที่ 1, 2 หรือ 3 ของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยาจะดำเนินการไปแบบสุ่ม จะย่อยไตรกลีเซอไรด์ได้อย่างสมบูรณ์ ได้ผลผลิตเป็นกลีเซอรอลและกรดไขมัน สำหรับตัวพยุงในการตรึงที่ใช้คือ แร่ดินเหนียวชื่อว่าแร่มอต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ทุติยภูมิ ประเภท 2:1 เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสามารถให้เอนไซม์ไลเปสเข้าไปยึดเกาะ โดยโครงสร้างพื้นฐานแต่ละหน่วยจะซ้อนกันไม่สนิท มีประจุลบในโครงสร้างมาก มีช่องว่างให้ไอออนบวกบางชนิดแทรกเข้าไปได้ มีการแลกเปลี่ยนกับไอออนของสารอินทรีย์ สามารถดูดยึดไอออนบวกไว้ได้มากทั้งบนผิวภายนอกและในช่องว่าง สำหรับวิธีการตรึงในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการดูดซับทางกายภาพโดยนำเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ไปจับกับพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุ ซึ่งเป็นตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งวิธีการตรึงนี้มีวิธีการเตรียมที่สะดวก สามารถนำตัวพยุงกลับมาใช้ใหม่ได้ ต้นทุนในการตรึงปานกลาง

5. สมบัติและมาตรฐานของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้นมาเพื่อลดการใช้น้ำมันดีเซล แต่เนื่องจากวัตถุดิบและกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน สมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จึงแตกต่างกัน เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติในการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาในภายหลังหลายๆ หน่วยงานทั้งในประเทศและต่างประเทศ จึงได้กำหนดสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล

สำหรับประเทศไทยรัฐบาลได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และมีปริมาณเพียงพอที่จะนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล รวมทั้งการกำหนดมาตรฐานและวิธีตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซล เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน

สมบัติทั้งกายภาพและเคมีแสดงถึงความสามารถในการนำไบโอดีเซลมาใช้งาน (รติกร อลงกรณ์โชติกุล. 2550: 146) และ (พิศมัย เจนวินิชปัญจกุล; และ ลลิตา อัตนโถ. 2549: 64-68)

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และเป็นสมบัติสำคัญของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลในกระบวนการผลิต ตามมาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณน้อยกว่าที่กำหนด แสดงถึงปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ใน

ไบโอดีเซลที่สูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ยิ่งมีค่ามากยิ่งให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เป็นสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความสำคัญด้านการซื้อขาย บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง แสดงถึงความแตกต่างขององค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นความหนาแน่นของไบโอดีเซลมีความแตกต่างอันเนื่องมาจากชนิดของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันต่างๆ ในน้ำมันพืชหรือสัตว์ รวมทั้งเมทานอลที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำ ไบโอดีเซลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ในประเทศมีค่าความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานคือ 860-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล

ความหนืดจลน์ ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล กำหนดให้ต่ำสุดเป็นระดับเดียวกับน้ำมันดีเซล ส่วนการกำหนดความหนืดสูงสุดที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นมีความสำคัญที่ถูกจำกัดด้วยการออกแบบระบบหัวฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ในห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งนำไปสู่การเกิดตะกอนและทำให้เกิดการซึมทะลุของละอองเชื้อเพลิงในกระบอกสูบ ไบโอดีเซลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ในประเทศมักมีความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่กำหนด เป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ เป็นข้อกำหนดเพื่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาและการขนถ่าย ไบโอดีเซลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ในประเทศมีจุดวาบไฟ 142-176 องศาเซลเซียส ซึ่งผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ส่วนใหญ่ไบโอดีเซลที่มีจุดวาบไฟต่ำกว่ามาตรฐานเนื่องมาจากขั้นตอนกระบวนการแยกเมทานอลที่เหลือจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ในกระบวนการผลิตเมทานอลซึ่งมีค่าจุดวาบไฟเพียง 12.2 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าตกค้างผสมอยู่ในไบโอดีเซลปริมาณมากจะทำให้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์และมีสมบัติการเผาไหม้ที่ไม่ดี

ปริมาณกำมะถัน

ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปริมาณกากถ่าน

เป็นการวัดแนวโน้มการตกตะกอนคาร์บอนของเชื้อเพลิง และเป็นการประมาณการของแนวโน้มสำหรับกากของถ่านที่เกิดขึ้น กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

จำนวนซีเทน

ค่าที่ใช้วัดคุณภาพของไบโอดีเซลในด้านคุณสมบัติในการติดไฟคือ ซีเทนนัมเบอร์ (CN) ค่าซีเทนยิ่งสูงจะมีค่า Ignition delay สั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่สะสมในห้องเผาไหม้จะลดลงก่อนการลุกติดไฟ ดังนั้นไบโอดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงจะทำให้การควบคุมการเผาไหม้ทำได้ดีขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้น

เถ้าซัลเฟต

เถ้าซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

น้ำ

ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนในไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ มีผลด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา

การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากกรดหรือเบสที่เหลือจากกระบวนการผลิตและปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ ซึ่งมีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

เนื่องจากไบโอดีเซลได้จากน้ำมันพืชจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพการเก็บ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไบโอดีเซลมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์สูงจะทำให้มีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลงอย่างมาก

ค่าความเป็นกรด

เป็นค่าที่ชี้บ่งปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ที่เกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของไขมัน จะเพิ่มขึ้นถ้าผ่านการผลิตที่ไม่เหมาะสมและเกิดการสลายตัวแบบออกซิเดชัน ค่าความเป็นกรดสูงกัดกร่อนในเครื่องยนต์ มีผลต่อการตกตะกอนของระบบน้ำมันเชื้อเพลิงและลดอายุการใช้งานของไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิง

ค่าไอโอดีน

แสดงถึงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีค่าจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น

กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลอิกเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณเมทานอล

เป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีค่าจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่ง และการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และกลีเซอรีนอิสระ

เป็นคุณสมบัติที่แสดงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันในกระบวนการผลิต เพื่อเปลี่ยนน้ำมันพืชหรือสัตว์ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไบโอดีเซลและได้กลีเซอรีนเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By-product) ถ้าปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จะแสดงในรูปของปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่สูงได้ และถ้าพบปริมาณกลีเซอรีนสูงย่อมแสดงว่ากระบวนการกำจัดกลีเซอรีนเกิดไม่สมบูรณ์ เมื่อค่าเหล่านี้สูงจนเกินไปจะเกิดการอุดตันของตัวไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงและปัญหาอื่นๆ ในระบบการทำงานของเครื่องยนต์ได้

โลหะกลุ่ม 1 และกลุ่ม 2

เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรด์ของเอสเทอร์อีกด้วย

ฟอสฟอรัส

เป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติก คอนเวอเตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) เหมาะสำหรับเครื่องยนต์สูบเดียว 4 จังหวะ สูบนอน ระบายความร้อนด้วยน้ำ เพื่อเป็นการส่งเสริมและสนับสนุนให้ชุมชนได้มีการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

ตาราง 10 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549

รายการ	คุณสมบัติ		ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ[1/]
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Density at 15 °C)	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่สูงกว่า 900	ASTM D 1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Viscosity at 40 °C)	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า 1.9 และไม่สูงกว่า 8.0	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ (Flash Point)	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
4	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0015	ASTM D 2622
5	จำนวนซีเทน (Cetane Number)		ไม่ต่ำกว่า 47	ASTM D 613
6	เถ้าซัลเฟต (Sulphated Ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
7	น้ำและตะกอน (Water and Sediment)	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า 0.2	ASTM D 2709
8	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)		ไม่สูงกว่าหมายเลข 3	ASTM D 130

ตาราง 10 (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ[1/]
9	ค่าความเป็นกรด (Acid Number) มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม	ไม่สูงกว่า 0.80	ASTM D 664
10	กลีเซอรีนอิสระ (Free Glycerine) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 6584
11	กลีเซอรีนทั้งหมด (Total Glycerine) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 1.5	ASTM D 6584
12	สี (Colour)	ม่วง[2/]	ตรวจพินิจด้วยสายตา
13	สารเติมแต่ง (Additive) (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

2/ ใช้สารประกอบประเภท1,4-dialkylamino anthraquinone และ alkyl derivatives of azobenzene-4-azo-2-naphthol

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2549). *ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 ลงวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2549.* กรุงเทพมหานคร.

การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เพื่อประโยชน์ในการกำกับดูแลคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับมาใช้ผสมน้ำมันดีเซล และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภค

ตาราง 11 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550

รายการ	คุณสมบัติ		ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Density at 15 °C)	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่สูงกว่า 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Viscosity at 40 °C)	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่สูงกว่า 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (Flash Point)	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10% Distillation Residue)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)		ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (Sulphated Ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (Water)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminant)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)		ไม่สูงกว่าหมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation Stability at 110 °C) ชั่วโมง		ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (Acid Number)	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (Iodine Value)	กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16	เมทานอล (Methanol)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110

ตาราง 11 (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ		ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
17	โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
20	กลีเซอรีนอิสระ (Free Glycerine)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
21	กลีเซอรีนทั้งหมด (Total Glycerine)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่มที่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่มที่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า 5.0	prEN 14538
23	ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (Additive) (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2550). *ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ลงวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2550.* กรุงเทพมหานคร.

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **สมบัติและมาตรฐานของไบโอดีเซล** เป็นการกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล สำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เพื่อให้การนำไปใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาในภายหลัง โดยออกประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน โดยแบ่งเป็นข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 เพื่อเป็นการส่งเสริมและสนับสนุนให้ชุมชนได้มีการผลิตและการใช้ไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร ส่วนข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 เพื่อประโยชน์ในการกำกับดูแลคุณภาพของไบโอ

ดีเซลสำหรับมาใช้ผสมน้ำมันดีเซล และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภค สำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบคุณภาพต่างๆ ของไบโอดีเซล สามารถส่งตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์คุณภาพได้ที่ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โครงการเคยู-ไบโอดีเซล อาคาร 1 ชั้น 4 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ปทุมธานี ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

6. ทฤษฎีการผลิต

แนวคิดเกี่ยวกับการผลิต (สุภาพ สุทธิรักษ์. 2550: 16-18)

1. ทฤษฎีการผลิต หมายถึง กระบวนการรวบรวมปัจจัยการผลิต (Input) อันได้แก่ ที่ดิน แรงงาน ทุน วัตถุดิบ และเทคโนโลยีต่างๆ มาผ่านกระบวนการการผลิตเพื่อผลิตเป็นสินค้าหรือบริการ (Output) ซึ่งในทางปฏิบัติ การผลิตสินค้าหรือบริการชนิดใดชนิดหนึ่งอาจมีวิธีการผลิตได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการผลิตแต่ละวิธีจะมีการใช้เทคนิคและส่วนผสมของปัจจัยการผลิตที่แตกต่างกันไป แต่วิธีการผลิตที่ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดก็คือ วิธีการผลิตที่ทำให้เสียต้นทุนการผลิตต่ำสุด หรือได้รับผลผลิตสูงสุดจากปัจจัยการผลิตจำนวนจำกัด (รัตนา สายคณิต; และ ชลลดา จามรกุล. 2547: 70) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต กับจำนวนผลผลิตที่ได้รับ ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตสามารถแบ่งเป็น 3 ระยะ ตามระยะเวลา ดังนี้

1.1 ระยะสั้น หมายถึง ช่วงเวลาการผลิตหนึ่งๆ หรือภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ ซึ่งเป็นช่วงเวลาการผลิตที่ผู้ผลิตไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณของปัจจัยการผลิตบางอย่างได้ เช่น ค่าเสื่อม ราคา เงินเดือนประจำ ที่ดิน ขนาดของโรงงาน เครื่องจักรแปรรูปไบโอดีเซล ฯลฯ เรียกต้นทุนเหล่านี้ว่าต้นทุนคงที่ ซึ่งโดยข้อเท็จจริงแล้วเป็นต้นทุนที่ไม่เปลี่ยนแปลงภายในช่วงเวลาหนึ่งๆ ส่วนปัจจัยต้นทุนอื่นๆ นั้น เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนผลผลิต เช่น วัตถุดิบ แรงงาน ฯลฯ ซึ่งเรียกว่า ต้นทุนผันแปร

$$TC = TFC + TVC$$

ในที่นี้ TC = ต้นทุนรวม

TFC = ต้นทุนคงที่รวม

TVC = ต้นทุนผันแปรรวม

1.2 ระยะยาว หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่นานพอที่ผู้ผลิตจะสามารถเปลี่ยนแปลงปัจจัยทุกตัวให้มีขนาดตามที่ต้องการได้ นั่นคือทุกปัจจัยการผลิตสามารถเปลี่ยนแปลงขยายเพิ่มเติมได้ตลอดเวลา ดังนั้น ในระยะเวลายาวปัจจัยทุกชนิดจะเป็นต้นทุนผันแปรเพียงอย่างเดียว

1.3 ระยะยาวมาก หมายถึง ช่วงเวลาการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของเทคนิคการผลิตในอุตสาหกรรมนั้นๆ เช่น มีการค้นพบเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ทำให้ผลผลิตมีคุณสมบัติดียิ่งขึ้นกว่าเดิม

2. ขนาดการดำเนินธุรกิจที่ทำให้กิจการคุ้มทุน (Break-even point)

ระดับคุ้มทุน หมายถึง ระดับการดำเนินธุรกิจที่ปริมาณสินค้าและบริการ มีผลทำให้ธุรกิจมีรายได้รวมทั้งสิ้น (TR) เท่ากับค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้นของสินค้าและบริการนั้น (TC) พอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าหมายถึง ระดับการดำเนินธุรกิจที่ไม่มีกำไรหรือไม่ขาดทุน หรือ กำไรหรือขาดทุนมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ถ้ากิจการสามารถดำเนินธุรกิจได้ในปริมาณที่มากกว่าระดับคุ้มทุนแล้วจะทำให้ได้รับกำไร แต่ถ้าดำเนินธุรกิจในระดับที่ต่ำกว่าระดับคุ้มทุนกิจการจะเผชิญกับการขาดทุน

การคำนวณปริมาณจุดคุ้มทุน

จากภาพประกอบ 30 กำหนดให้

TR	=	รายได้ทั้งหมด
TC	=	ต้นทุนทั้งหมด
P	=	ราคาขายต่อหน่วย (บาทต่อลิตร)
Q	=	ปริมาณที่ผลิต (ลิตร)
Q_b	=	ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุน
B	=	ระดับจุดคุ้มทุนที่ทำให้รายได้รวมเท่ากับต้นทุนรวม
TFC	=	ต้นทุนคงที่ทั้งหมด (บาท)
TVC	=	ต้นทุนผันแปรทั้งหมด (บาท)
AVC	=	ต้นทุนผันแปรทั้งหมดเฉลี่ย (บาทต่อลิตร)

จากแนวคิดเกี่ยวกับการผลิต

$$TR = TC$$

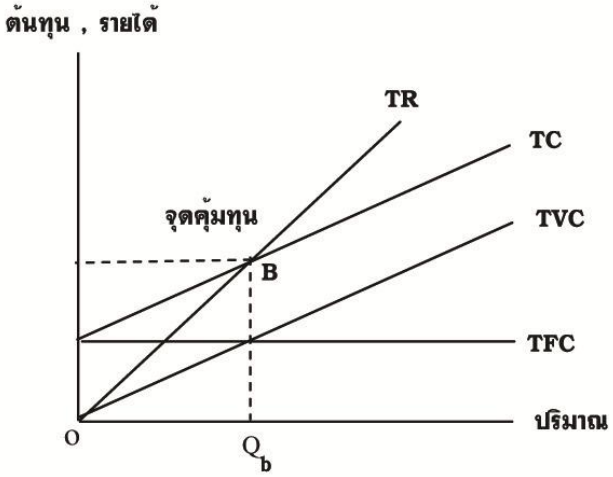
$$TR = TFC + TVC$$

$$P * Q = TFC + (AVC * Q)$$

$$(P*Q) - (AVC*Q) = TFC$$

$$Q(P - AVC) = TFC$$

$$\text{ปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุน } (Q_b) = \frac{TFC}{P - AVC}$$



ภาพประกอบ 30 ปริมาณธุรกิจ ณ ระดับจุดคุ้มทุน

ที่มา: สุภาพ สุทธิรักษ์. (2550). *การดำเนินธุรกิจการผลิตไบโอดีเซลของชุมชน : กรณีน้ำมันใช้แล้ว*. หน้า 18

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **ทฤษฎีในการผลิต** ในงานวิจัยนี้จะคิดต้นทุนผันแปรในการผลิตไบโอดีเซลคือ ค่าวัตถุดิบของน้ำมันปาล์ม และค่าสารเคมี เช่น ค่าใช้จ่ายเมทานอล เฮกเซน เอนไซม์ไลเปส แว่มอนต์มอริลโลไนต์ และต้นทุนคงที่คือ เอนไซม์ตรึงรูปที่นำกลับมาใช้งานซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไป ส่วนจุดคุ้มทุนนั้นจะคำนึงถึงต้นทุนทั้งหมดคือต้นทุนผันแปรและต้นทุนคงที่ จำนวนปริมาณของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ราคาขายต่อหน่วย (บาทต่อลิตร) ที่น่าจะเป็นไปได้ และปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุน ทำให้ทราบว่าการผลิตไบโอดีเซลที่ได้นั้นสมควรที่จะดำเนินการทำธุรกิจไปในทิศทางใด

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของในประเทศ

สุภาพ สุทธิรักษ์ (2550: บทคัดย่อ) ศึกษาสภาพทั่วไป พฤติกรรมและทัศนคติของผู้ใช้ไบโอดีเซล ผลการดำเนินธุรกิจการผลิตไบโอดีเซลของชุมชน พบว่า พฤติกรรมการใช้ไบโอดีเซล กลุ่มตัวอย่างอายุ 41-50 ปี เพศชายร้อยละ 83 โดยส่วนใหญ่ให้เหตุผลว่าอยากทดลองใช้มากที่สุด เครื่องจักรกลที่ใช้เป็นรถยนต์มากที่สุดร้อยละ 83 ส่วนใหญ่ใช้สลับกับการใช้น้ำมันดีเซล ปริมาณการใช้เฉลี่ย 141.82 ลิตร/เดือน/ราย ในราคาเฉลี่ย 21 บาทต่อลิตร มีความพึงพอใจต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลในระดับความพึงพอใจมาก โดยคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ไม่ทำความเสียหายต่อเครื่องยนต์ ราคาถูกกว่าน้ำมันดีเซล คุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลความสิ้นเปลืองน้ำมัน มลพิษจาก

ท่อไอเสียลดลง เสียงเครื่องยนต์ไม่ดังกว่าการใช้น้ำมันดีเซล ความพึงพอใจน้อยที่สุดคือ ในด้านการหาซื้อสะดวก สำหรับทัศนคติภายหลังการใช้น้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่มีความต้องการใช้ต่อไป คิดเป็นร้อยละ 94 โดยให้เหตุผลว่าราคาถูกประหยัดลดต้นทุน ผลการดำเนินธุรกิจพบว่าได้รวบรวมวัตถุดิบคือน้ำมันที่ใช้แล้วในตลาด ร้านอาหาร ภัตตาคาร โรงแรมและตามโรงงานต่างๆ ในพื้นที่ของตนเอง และพื้นที่ใกล้เคียง ราคารับซื้อ 7-12 บาท/ลิตร ขนาดกำลังการผลิต100 และ 400 ลิตร/ครั้ง ชุมชนทำการผลิตโดยเฉลี่ย 21,600 ลิตร/ปี ต้นทุนการผลิต 15.94 บาท/ลิตร ราคาขาย 21 บาทต่อลิตร กำไร 5.08 บาท/ลิตร อัตราตอบแทนสุทธิร้อยละ 24.19 ปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 4,127.39 ลิตร/ปี สำหรับนโยบายและมาตรการของรัฐนั้นควรสนับสนุนชุมชนในการตรวจสอบคุณภาพมาตรฐานโดยไม่ต้องเสียค่าตรวจสอบและกำหนดมาตรฐานต่างๆ ให้ครอบคลุมถึง B100

ปรเมษฐ์ น่วมเปี่ย และ สินศุภา จุ้ยจุลเจิม (2549: บทคัดย่อ) ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสเพื่อทำการย่อยไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันชนิดต่างๆ ให้เป็นกรดไขมันมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลชนิดอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน การใช้เอนไซม์ในลักษณะต่างกันส่งผลให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ที่ได้แตกต่างกันออกไป พบว่าเอนไซม์อิสระให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์อิสระสูงกว่าเอนไซม์ตรึงรูป และน้ำล้างจากการตรึงรูปของเอนไซม์ 3-4 เท่า ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ความเร็วรอบของการเขย่า 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ศิริรัตน์ โรจนพิพัฒน์กุล และ วศินี พุมมา (2548: บทคัดย่อ) ศึกษาการทำทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามอนต์มอริลโลไนต์ พบว่า K_2CO_3 และ $LiNO_3$ ปริมาณ 2.6 มิลลิโมล บนตัวเร่งปฏิกิริยามอนต์มอริลโลไนต์ ที่ถูกเตรียมที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนน้ำมันปาล์ม : เมทานอล : เร่งปฏิกิริยา เป็น 10:40:1 (กรัม/มิลลิลิตร/กรัม) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด คือ 94.66% และ 87.37% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบเกลือของโลหะชนิดเดียวกันเกลือไนเตรทจะให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าเกลือคาร์บอเนต และมอนท์มอริลโลไนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าซีโอไลท์เล็กน้อย ซึ่งเหตุผลที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะเนื่องจากว่ามันง่ายต่อการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ออกจากกัน และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

งานวิจัยของต่างประเทศ

แซนเจย์ และ สกุนาน (Gopinath Sanjay; & Sankaran Sugunan. 2008: 361) วิธีการเตรียมตัวพยุงสำหรับการดูดซับ โดยนำ montmorillonite K10 ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ และกวนอย่างแรงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำมากรอง อบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อได้ตัวพยุงแล้วก็นำไป

ผสมกับเอนไซม์ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ pH ต่างๆ ที่เอนไซม์แต่ละชนิดสามารถทำกิจกรรมได้ดีที่สุด เพื่อหาปริมาณโปรตีนที่ยึดเกาะ ประสิทธิภาพการตรึง กิจกรรมของเอนไซม์ที่ถูกตรึง เป็นต้น

ชอว์ และคนอื่นๆ (Ping Shao; et al. 2008: 283) ทำการศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลเปส *Candida rugosa* สำหรับเป็นตัวเร่งในการผลิตไบโอดีเซลจากไขสบู่เมล็ดเรดซีฟ พบว่าใช้สารตั้งต้นที่มีส่วนผสมระหว่างไขสบู่เมล็ดเรดซีฟและเมทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:4 โดยใช้เอนไซม์ไลเปส *Candida rugosa* ที่ถูกตรึงบนไคโตซานด้วยวิธีเชื่อมไขว้ ใช้ปริมาณเอนไซม์ร้อยละ 8 ปริมาณน้ำร้อยละ 6 ของน้ำหนักสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้สูงมากกว่าร้อยละ 95

โซมาโน และ บอนด์เชเออร์ (Mohamed M. Soumanou; & Uwe T. Bornscheuer. 2003: 97-103) ได้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นในน้ำมันเมล็ดทานตะวัน โดยใช้เอนไซม์ไลเปสจาก *Pseudomonas fluorescens* ที่ตรึงบนโพลิโพรไพลิน (polypropylene, EP100) ซึ่งเป็นตัวพยุงที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยใช้สภาวะในการตรึง คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.025 กรัมต่อมิลลิลิตร พีเอช 7 พบว่าได้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เท่ากับ 3.3 หน่วยต่อมิลลิกรัม และเมื่อนำไปเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:3 ปริมาณเอนไซม์ที่ถูกตรึง ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมัน ไม่มีน้ำในปฏิกิริยา บ่มที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เฮกเซน ไซโคลเฮกเซน เอ็น-เฮปเทน ไอโซออกเทน อะซีโตน และปิโตรเลียมอีเทอร์ พบว่า เฮกเซนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเฮกเซน เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้ดี และนอกจากนี้ยังไม่มีผลกระทบต่อ conformation ของเอนไซม์

ฟองเต และคนอื่นๆ (Isidoro Emilio de Fuentes; et al. 2001: 657-663) จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาค่ากิจกรรมของเอนไซม์ที่ได้จากการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีดูดซับของเอนไซม์ไลเปสจาก *Rhizomucor miehei* (RML) และเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida cylindracea* (CCL) บนไพโลซิลิเกต 3 ชนิด คือ sepiolite (SEP) palygorskite (PAL) และ montmorillonite (MON) สามารถหาค่าการดูดซับของเอนไซม์ด้วยวิธีของ Bradford โดยวัดปริมาณโปรตีนก่อนและหลังการตรึงเอนไซม์ หลังจากนั้นคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การตรึง พบว่าที่สภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 กวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถตรึงเอนไซม์ MON-CCL ได้ร้อยละของการตรึง 87 โดยใช้โปรตีน 28 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของ montmorillonite และ ได้ร้อยละของการตรึง 98 โดยใช้โปรตีน 45 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของ montmorillonite ซึ่งเอนไซม์สามารถตรึงอยู่บนซิลิเกตได้โดยการดูดซับของไอออนผ่านประจุบวกของ

หมู่โปรตีน และประจุลบที่เหลือของ silanol ของตัวพยุง และสามารถดูลักษณะของเอนไซม์ตรึงรูปบนตัวพยุงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy, SEM) ได้

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า **งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งภายในและต่างประเทศนั้น เกี่ยวข้องกับการตรึงเอนไซม์ การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน อิทธิพลของตัวทำละลาย ปริมาณเอนไซม์ตรึงรูปที่ใช้เป็นตัวเร่ง ความเร็วรอบในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณสารประกอบของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น พอสรุปได้ดังนี้ การตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพนั้น จะต้องมีการเตรียมตัวพยุงให้มีรูพรุนและพื้นที่ผิวเพื่อให้เอนไซม์ตรึงอยู่บนตัวพยุงได้ ทำการตรึงเอนไซม์ในสภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ ที่ pH ต่างๆ ซึ่งเอนไซม์ชนิดนั้นทำกิจกรรมได้สูงสุด การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันทำโดยใช้สารตั้งต้นในอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสม มีตัวทำละลายอินทรีย์ช่วยให้เมทานอลสามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้ดี ลดการสัมผัสระหว่างเอนไซม์ไลเปสกับเมทานอลได้ ใช้ปริมาณเอนไซม์ตรึงรูปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เหตุผลที่ใช้เพราะเนื่องจากว่าง่ายต่อการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ออกจากกัน และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ความเร็วรอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบของเอสเทอร์สูงสุด จึงทำให้เกิดรูปแบบเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัยต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ เริ่มจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา นำไปผลิตไบโอดีเซล ทดสอบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 การนำเอนไซม์ตรึงรูปกลับมาใช้ใหม่ และต้นทุนการผลิตต่อหน่วย รายละเอียดของวิธีการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย

1. สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
2. ตัวแปรที่ศึกษา
3. สถานที่ในการวิจัย
4. วิธีดำเนินการวิจัย
5. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

1. สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.1 สารเคมี

เอนไซม์ไลเปสทางการค้าคือ เอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* Type VII , 700-1,500 units/mg บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศญี่ปุ่น

แร่ดินเหนียวทางการค้าคือ มอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน

สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7

น้ำดีไอออไนซ์

น้ำมันปาล์ม ได้รับการเอื้อเฟื้อจากบริษัทปาล์มทองออยล์จำกัด ที่อยู่ 121/4 หมู่ 6 ต.ท่าแซะ อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร

เมทานอล

เฮกเซน

1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

เครื่องกรองสุญญากาศ รุ่น DOA-V505-BN ยี่ห้อ GAST

เครื่องพีเอชมิเตอร์ รุ่น MP220 ยี่ห้อ Mettler

เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (incubator shaker) รุ่น innova 4000 ยี่ห้อ New Brunswick Scientific

เตาเผา รุ่น ELF ยี่ห้อ Carbolite Furnaces

ตู้อบ รุ่น ULM 500 ยี่ห้อ Memmert

เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 4001-02 ยี่ห้อ Thermo Spectronic

เครื่องให้ความร้อน แบบกวน รุ่น HTS 1003 ยี่ห้อ LMS

เครื่องกลั่นระเหย รุ่น R-114 ยี่ห้อ Buchi

เครื่องผสมสารละลาย รุ่น G-560E ยี่ห้อ Vortex-2-Genie

เครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน รุ่น PLC-012 ยี่ห้อ Harmonic Series

เครื่องชั่งไฟฟ้า รุ่น BP 410 ยี่ห้อ Sartorius

2. ตัวแปรที่ศึกษา

การทดลองวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรดังนี้

2.1 ตัวแปรต้น

2.1.1 อัตราส่วน

- อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล

2.1.2 ลักษณะการใช้เอนไซม์

- เอนไซม์ไลเปสอิสระ
- เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป

2.1.3 อุณหภูมิ

2.1.4 เวลาสัมผัส

2.2 ตัวแปรตาม

ไบโอดีเซล เทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549

2.2.1 คุณภาพของไบโอดีเซล

2.2.2 ปริมาณของไบโอดีเซล

2.3 ตัวแปรควบคุม

2.3.1 เฮกเซน

2.3.2 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7

3. สถานที่ในการวิจัย

สถานที่ที่เอื้อประโยชน์ในการวิจัยคือ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อาคาร 15 คณะแพทยศาสตร์-วิทยาศาสตร์ เลขที่ 114 ซอยสุขุมวิท 23 ถนนอโศกมนตรี แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

4. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

4.1.1 การเตรียมตัวพยุง แซนเจย์ และ สุกุนาน (Gopinath Sanjay; & Sankaran Sugunan. 2008: 361)

1. นำตัวพยุงคือ มอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 มาล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์
2. กวนอย่างแรง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. กรองผ่านกระดาษกรองวอทแมน เบอร์ 42
4. นำไปอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. หลังจากนั้นนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เก็บไว้ในโถดูดความชื้น จะได้ตัวพยุงที่พร้อมใช้งาน

4.1.2 การตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ ฟองเต; และคนอื่นๆ (Isidoro Emilio de Fuentes; et al. 2001: 658)

1. ชั่งเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* 28 มิลลิกรัม และตัวพยุงในข้อที่ 4.1.1 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปกรวยพร้อมจุกแก้วขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 28 มิลลิลิตร
3. นำไปวางบนเครื่องเขย่า ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองวอทแมน เบอร์ 1
5. ล้างตัวพยุงด้วยน้ำดีไอออไนซ์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง เก็บสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน และหาปริมาณโปรตีนที่ยึดเกาะ (ดังภาคผนวก ข)
6. หลังจากนั้นทำให้แห้งและเก็บในตู้เย็น เรียกว่าเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป

4.2 หาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

4.2.1 การทดลองที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากข้อ 4.1

1. ใช้เอนไซม์ไลเปสอิสระต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้เอนไซม์ไลเปสอิสระปริมาณร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยากับสับสเตรท (น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล) และใส่เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน และใส่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

2. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง

3. เมื่อครบเวลา แยกผลผลิตที่ได้ออกจากเอนไซม์ไลเปส โดยไปเข้าเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอนด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. นำผลผลิตที่ได้ มาทำการระเหยเมทานอล และเฮกเซนออก ด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนไม่มีเมทานอลและเฮกเซนระเหยออกมาอีก

5. นำผลผลิตซึ่งคาดว่าจะเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 ของการทดลองที่ 1 แต่ใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ปริมาณร้อยละ 70, 80, 90 และ 100 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์มแทน ตามลำดับ

4.2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

1. ใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป ปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยากับสับสเตรท (น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล) และใส่เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน และใส่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

2. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเก็บตัวอย่างที่เวลาสัมผัส 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นใหม่ในข้อ 1 ของการทดลองที่ 2 ของแต่ละปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่ใช้ตามลำดับของทุกช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างแล้ว

3. เมื่อครบเวลา แยกผลผลิตที่ได้ออกจากเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป โดยไปเข้าเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอนด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. นำผลผลิตที่ได้ มาทำการระเหยเมทานอล และเฮกเซนออก ด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนไม่มีเมทานอลและเฮกเซนระเหยออกมาอีก

5. นำผลผลิตซึ่งคาดว่าจะเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 ของการทดลองที่ 2 แต่ใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ปริมาณร้อยละ 80, 90 และ100 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์มแทนตามลำดับ

4.2.3 **การทดลองที่** 3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

1. ใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ทำปฏิกิริยากับสับสเตรท (น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล) และใส่เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน และใส่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

2. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเก็บตัวอย่างที่เวลาสัมผัสเหมาะสมจากการทดลองที่ 2

3. เมื่อครบเวลา แยกผลผลิตที่ได้ออกจากเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป โดยไปเข้าเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอนด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. นำผลผลิตที่ได้ มาทำการระเหยเมทานอล และเฮกเซนออก ด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนไม่มีเมทานอลและเฮกเซนระเหยออกมาอีก

5. นำผลผลิตซึ่งคาดว่าจะเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 ของการทดลองที่ 3 แต่บ่มที่อุณหภูมิ 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียสแทน ตามลำดับ

4.2.4 **การทดลองที่ 4** ศึกษาปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

1. ใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ทำปฏิกิริยาโดยใช้สับสเตรทที่มีส่วนประกอบน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ในอัตราส่วน 1:3 (โมล/โมล) และใส่เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน และใส่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

2. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที บ่มที่อุณหภูมิจากการทดลองที่ 3 และเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2

3. เมื่อครบเวลา แยกผลผลิตที่ได้ออกจากเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป โดยไปเข้าเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอนด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. นำผลผลิตที่ได้ มาทำการระเหยเมทานอล และเฮกเซนออก ด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนไม่มีเมทานอลและเฮกเซนระเหยออกมาอีก

5. นำผลผลิตซึ่งคาดว่าจะเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ1-5 ของการทดลองที่ 4 โดยใช้สับสเตรทที่มีส่วนประกอบน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ในอัตราส่วน 1:4, 1:5 และ 1:6 (โมล/โมล) และเฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซนแทน และใส่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ตามลำดับ

4.2.5 **การทดลองที่ 5** ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

1. นำสับสเตรทที่มีอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลจากการทดลองที่ 4 คือ 1:4 และเฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน และปริมาณเอนไซม์ตรึงรูป จากการทดลองที่ 2 คือปริมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม และใส่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

2. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที บ่มที่อุณหภูมิจากการทดลองที่ 3 คือ 45 องศาเซลเซียส และเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 คือ 12 ชั่วโมง และเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็น 24, 36, 48, 60, 72, 84 และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ

3. เมื่อครบเวลา แยกผลผลิตที่ได้ออกจากเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป โดยไปเข้าเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอนด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. นำผลผลิตที่ได้ มาทำการระเหยเมทานอล และเฮกเซนออก ด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนไม่มีเมทานอลและเฮกเซนระเหยออกมาอีก

5. นำผลผลิตซึ่งคาดว่าจะเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

6. นำตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ส่งไปวิเคราะห์คุณภาพตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงานต่อไป

4.3 การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล

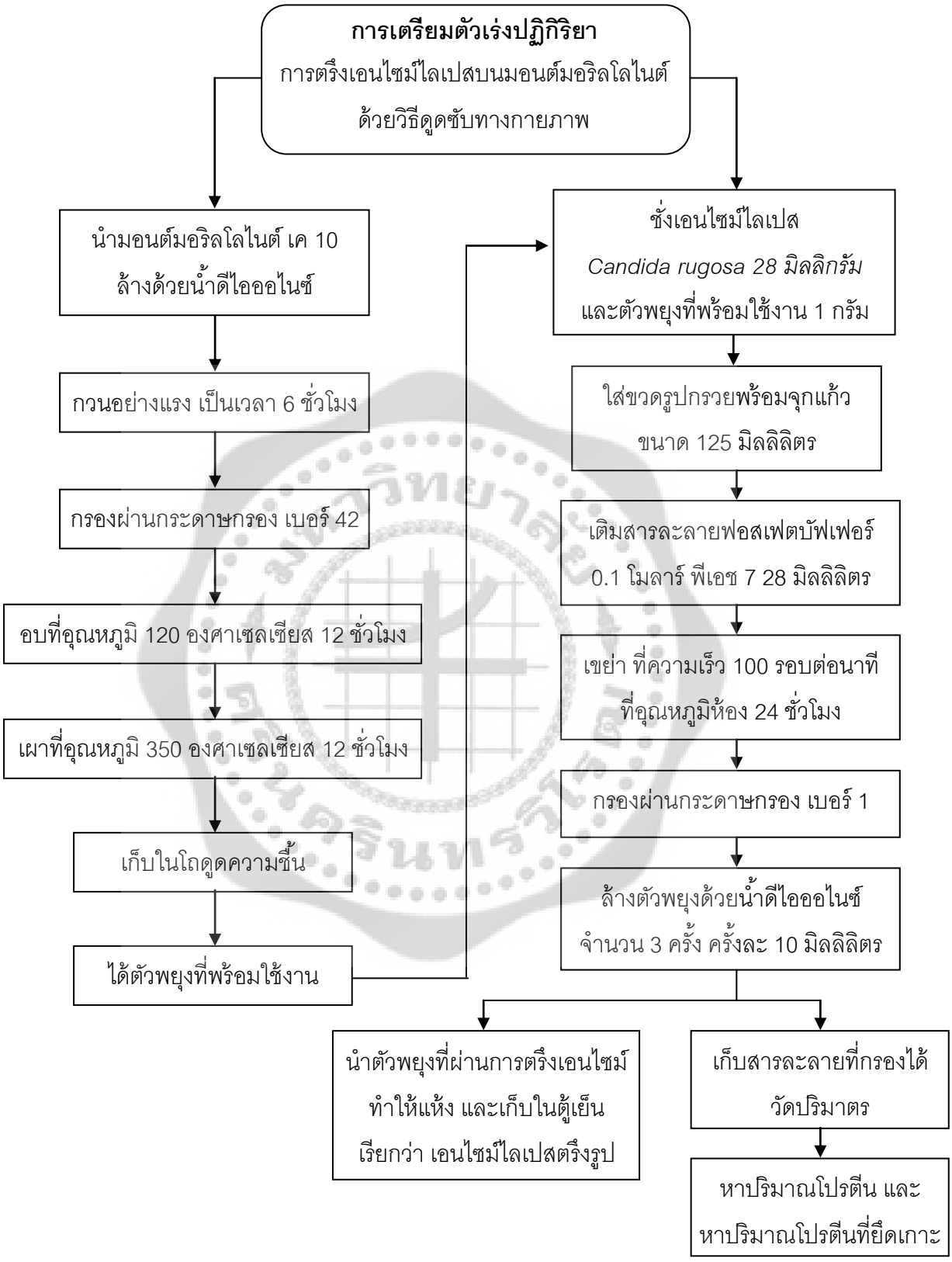
นำไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้จากการทดลองที่ 5 ในข้อที่ 4.2.5 ไปวิเคราะห์คุณภาพของไบโอดีเซล ที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน โดยเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549

4.4 การนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ใหม่

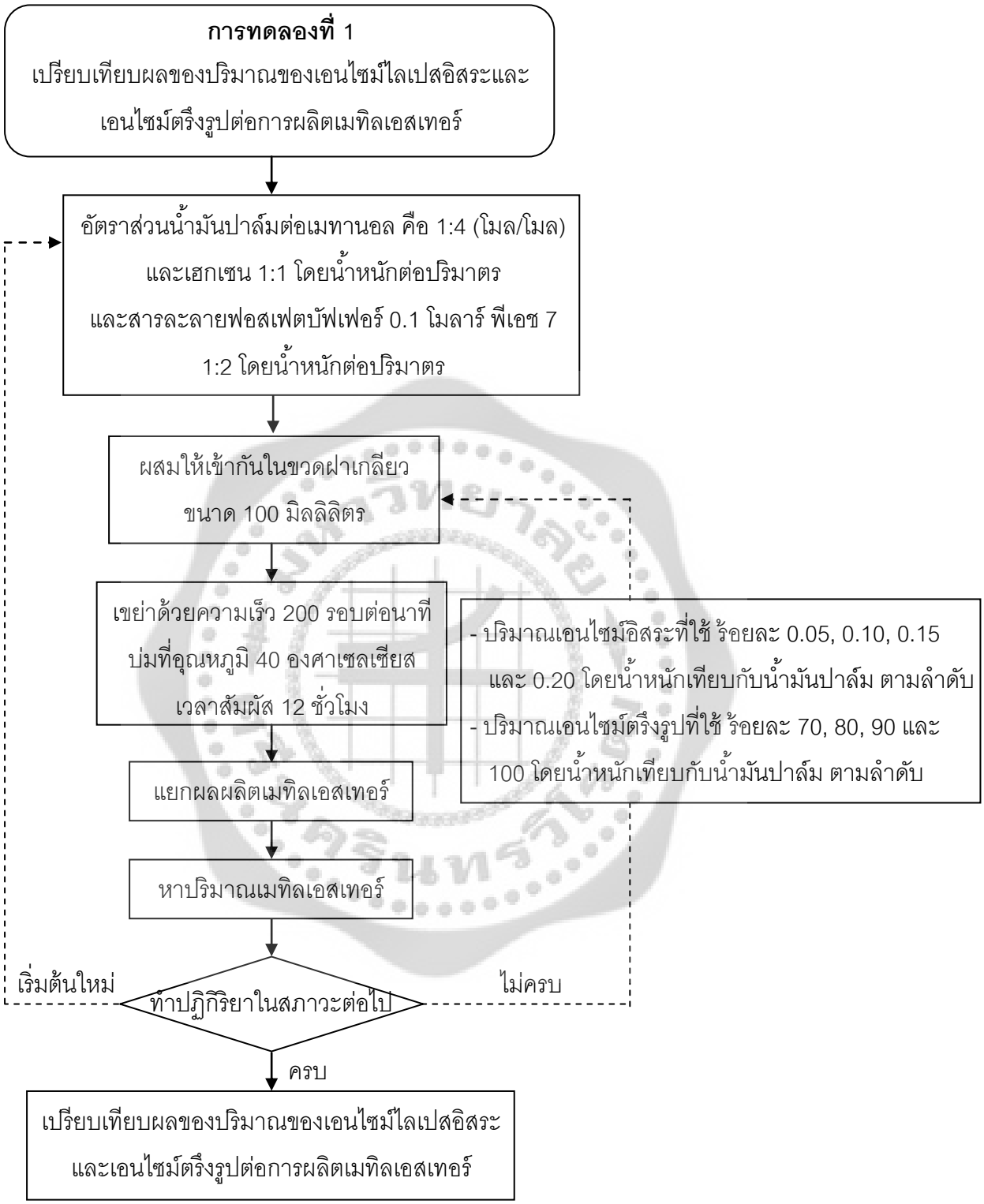
ทดสอบโดยนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลครั้งแรกจากข้อที่ 4.2.5 เท่ากับ 1 ครั้ง มาล้างด้วยเฮกเซน 5 มิลลิลิตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 5 มิลลิลิตร ทำให้แห้งในระบบสุญญากาศ แล้วนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลครั้งต่อไป โดยประมาณการว่าในแต่ละครั้งของการผลิตไบโอดีเซลใช้เวลาใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ 5 โดยคิดปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ในครั้งแรกเทียบเป็นร้อยละ100 จนกว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะลดลงร้อยละ 50 เพื่อหาจำนวนครั้งที่สามารถใช้เอนไซม์ตรึงรูปในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล)

4.5 ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วย

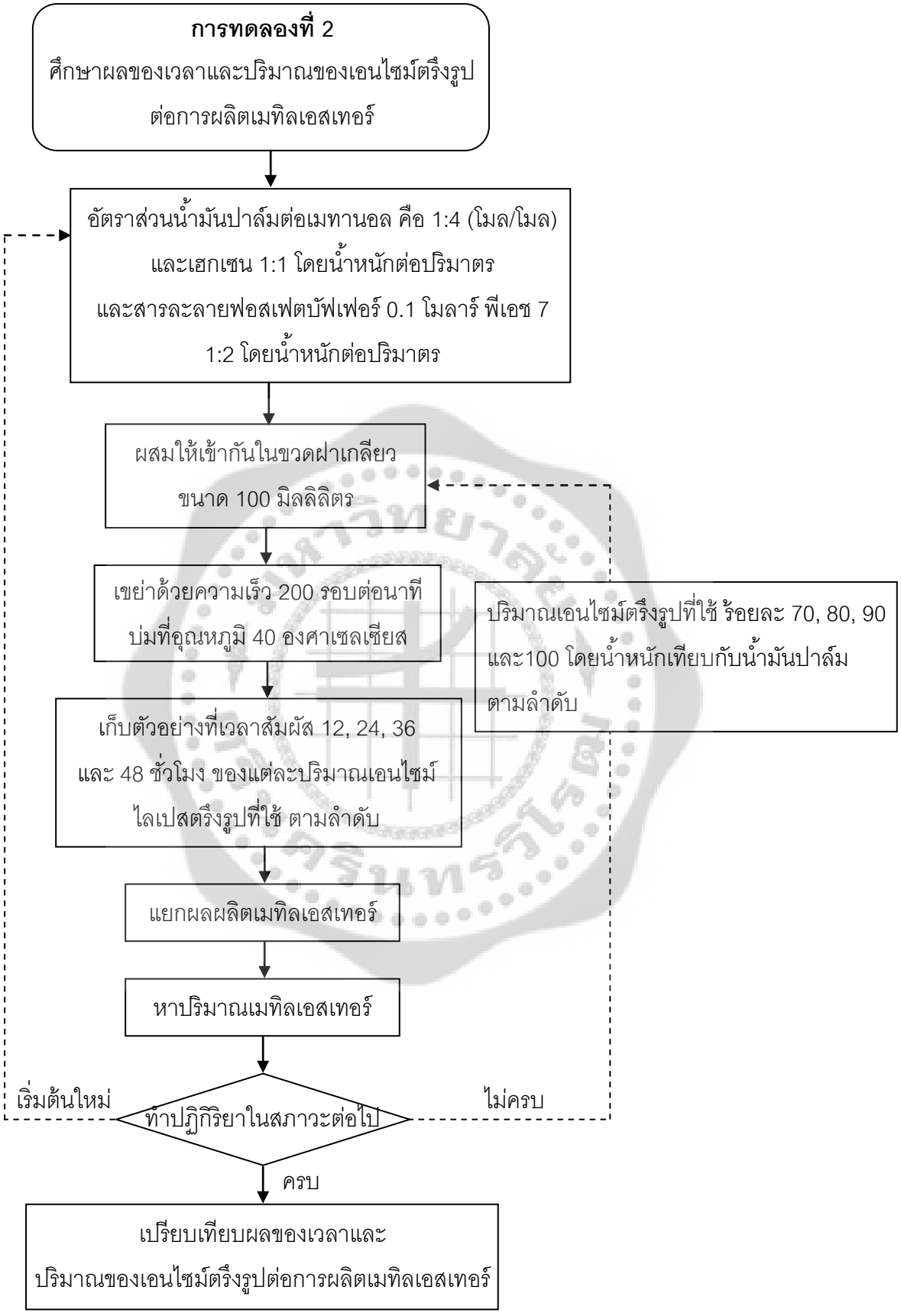
คิดต้นทุนของการผลิตในหน่วยราคาบาทต่อลิตร ได้แก่ ค่าวัตถุดิบของน้ำมันปาล์ม ค่าสารเคมี เช่น ค่าใช้จ่ายเมทานอล เฮกเซน เอนไซม์ไลเปส แร่มอนต์มอริลโลไนต์ และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ จำนวนครั้งของเอนไซม์ตรึงรูปที่นำกลับมาใช้งานซ้ำ



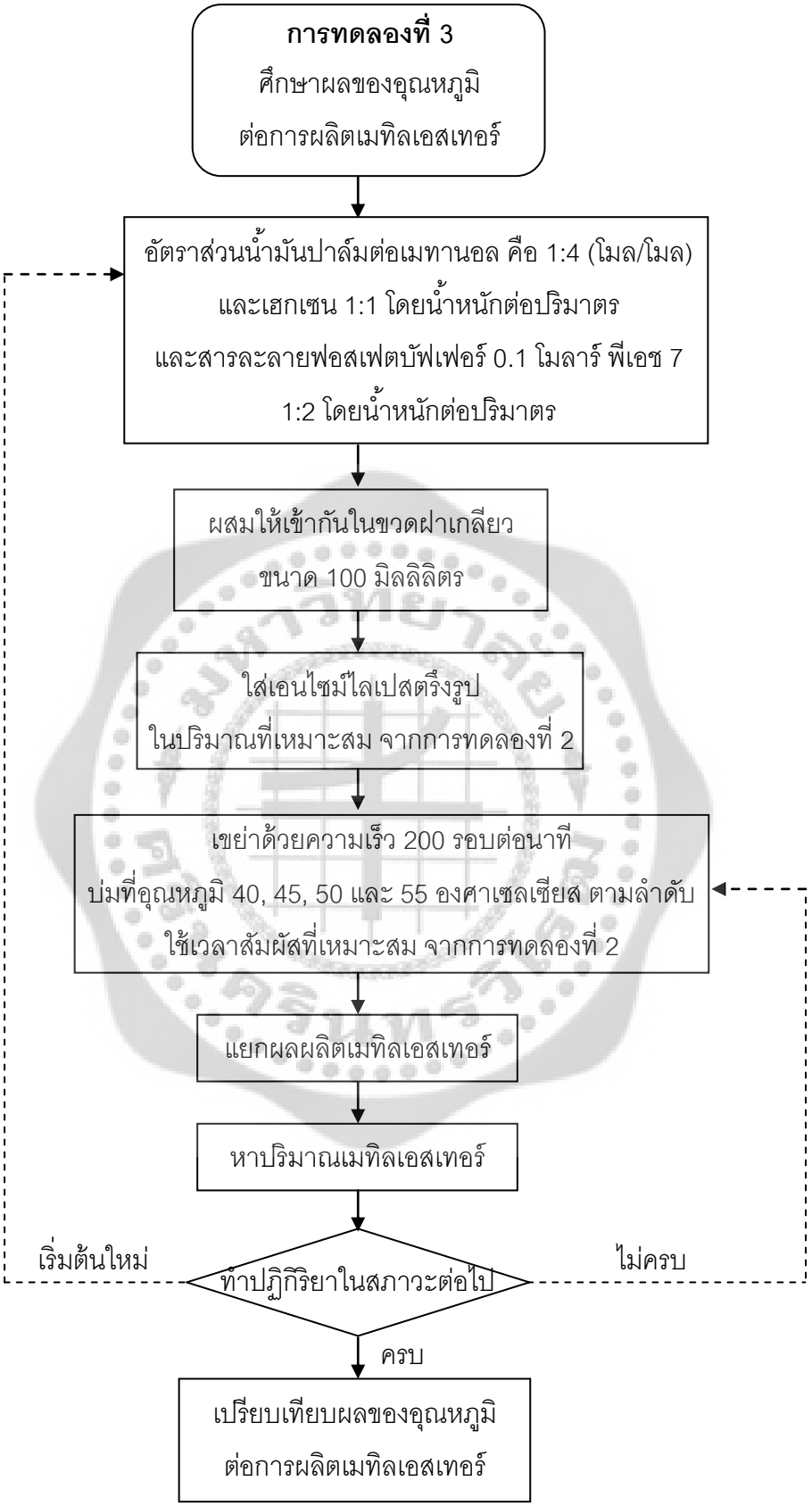
ภาพประกอบ 31 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา



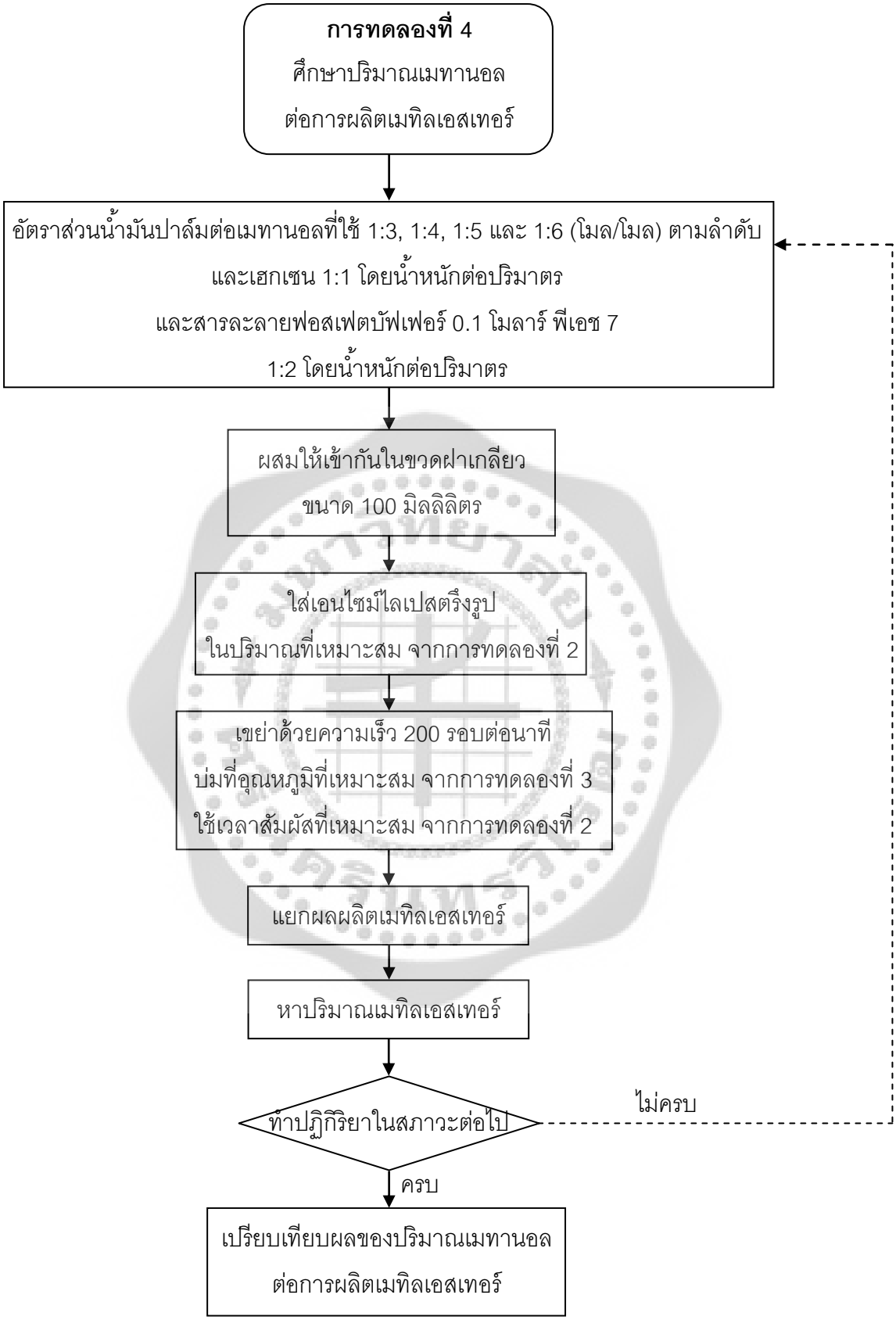
ภาพประกอบ 32 แผนผังการศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์



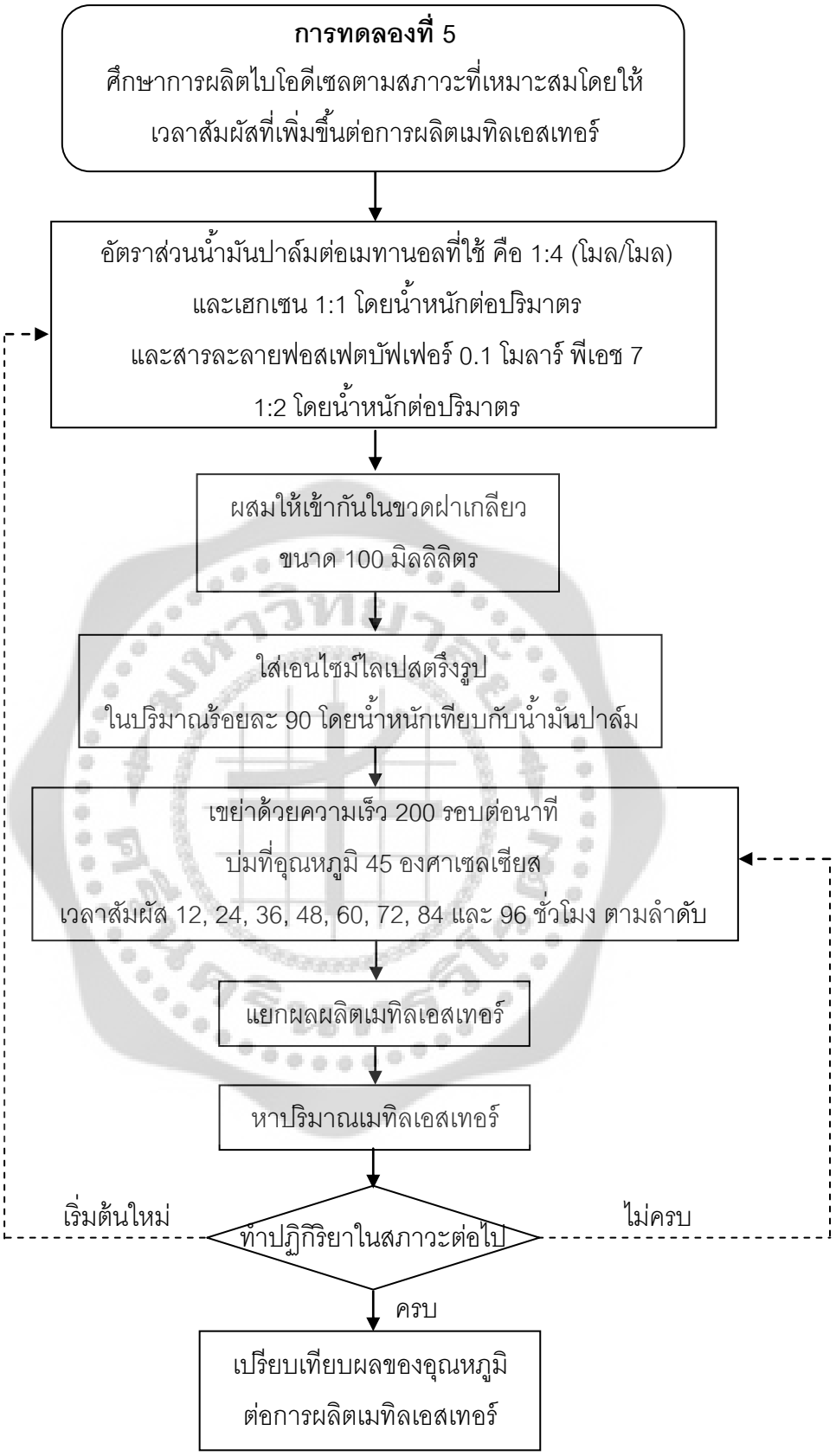
ภาพประกอบ 33 แผนผังการศึกษาผลของเวลาและปริมาณของเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์



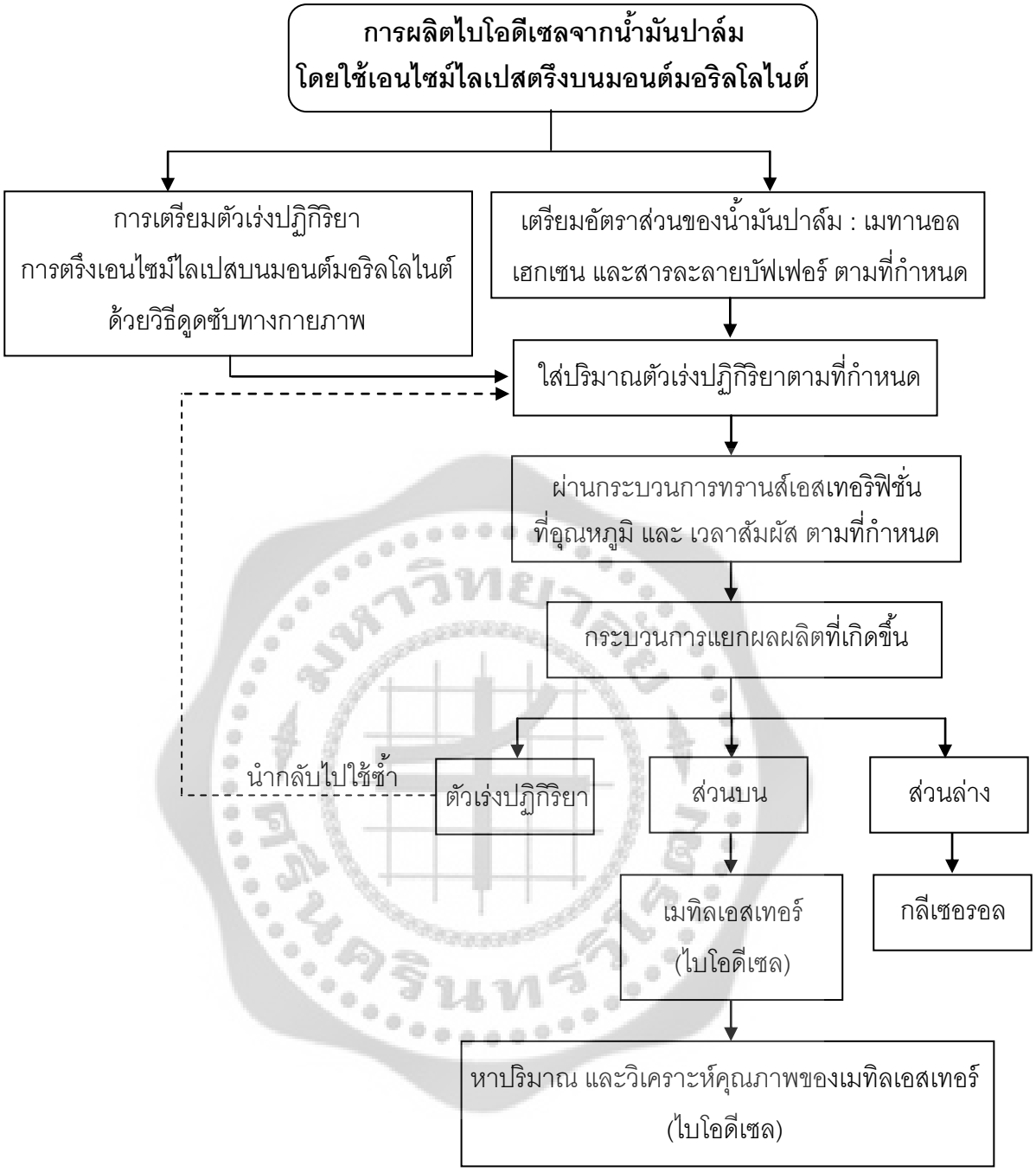
ภาพประกอบ 34 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์



ภาพประกอบ 35 แผนผังการศึกษาปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์



ภาพประกอบ 36 แผนผังการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์



ภาพประกอบ 37 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์

5. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. หาร้อยละ (Percentage) โดยใช้สูตร

$$P = \frac{f}{N} \times 100$$

เมื่อ P แทน ค่าร้อยละ

f แทน ความถี่ที่ต้องการแปลงให้เป็นค่าร้อยละ

N แทน จำนวนความถี่ทั้งหมด

2. หาค่าเฉลี่ย (Mean) โดยใช้สูตร

$$\overline{X} = \frac{\sum X}{n}$$

เมื่อ $\overline{X}$ แทน ค่าเฉลี่ย

$\sum X$ แทน ผลรวมของคะแนนทั้งหมดของกลุ่ม

n แทน จำนวนของคะแนนในกลุ่ม

3. หาค่าความสัมพันธ์ด้วยการวิเคราะห์ Paired samples test (t-test) โดยใช้สูตร

$$t = \frac{\bar{d}}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad \text{โดยที่ } \bar{d} = \frac{\sum d}{n} \text{ และ } S_d = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{d})}{n-1}}$$

$$df = n - 1$$

เมื่อ t แทน ค่าสถิติ t ที่ใช้ในการทดสอบ

d แทน ค่าผลต่างของคะแนน

$\bar{d}$ แทน ค่าเฉลี่ยของผลต่างของคะแนน

S_d แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างของคะแนน

n แทน จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการศึกษาการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ เริ่มจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อนำไปผลิตไบโอดีเซล แล้วนำผลที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติไบโอดีเซล โดยนำไปเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 และมีการนำเอนไซม์ตรึงรูปจากตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมนำกลับมาใช้ซ้ำ จากนั้นมีการคำนวณและเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตหน่วยบาทต่อลิตร

รายละเอียดของผลการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ
2. หาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

2.1 การทดลองที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

2.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

2.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

2.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

3. การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล
4. การศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ซ้ำ
5. ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วย

จากสมมติฐานการวิจัย ผลผลิตไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักไบโอดีเซล มีคุณภาพเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ โดยเริ่มจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา รายละเอียดดังการทดลองดังต่อไปนี้

เมื่อตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ โดยใช้เอนไซม์ไลเปส *Candida rugosa* 28 มิลลิกรัมละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 28 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ที่เป็นตัวพยุงจำนวน 1 กรัม ผลการทดลองแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 แสดงปริมาณโปรตีนก่อน-หลังการตรึงเอนไซม์ และร้อยละของการตรึงเอนไซม์บนมอนต์มอริลโลไนต์ จากการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

ครั้งที่	ปริมาณโปรตีน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)		ร้อยละของการตรึงเอนไซม์บนมอนต์มอริลโลไนต์
	ก่อน	หลัง	
1	79.392	8.446	89.36
2	80.070	9.291	88.40
ค่าเฉลี่ย			88.88

จากผลการทดลองตาราง 12 พบว่า หลังจากการตรึงเอนไซม์บนมอนต์มอริลโลไนต์แล้วสามารถหาปริมาณโปรตีนที่เหลืออยู่เทียบกับปริมาณโปรตีนเริ่มต้นซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายเอนไซม์สามารถคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละของการตรึงเอนไซม์บนมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 88.88

2. การหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ หลังจากที่ได้เอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีการทดลองที่ 1 – 5 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การทดลองที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากผลการทดลองดังตาราง 12

การทดลองที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปในปริมาณร้อยละ 70, 80, 90 และ 100 โดยเทียบกับน้ำหนักน้ำมันปาล์ม สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยากับสับสเตรท คือ น้ำมันปาล์มต่อเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมล 1:4 มีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ ผลการทดลองแสดงในตาราง 13 และ ตาราง 14

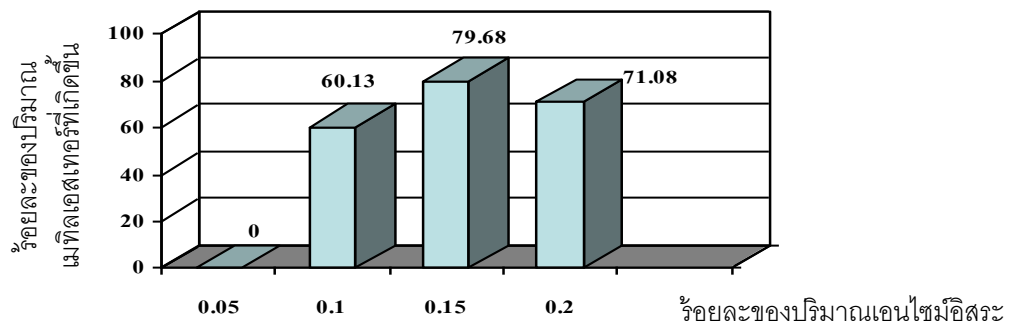
ตาราง 13 แสดงผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

สภาวะที่ทดลอง	ร้อยละของปริมาณเอนไซม์อิสระที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย - น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1 : 4 โมล/โมล - เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส - เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที - เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง	0.05	วัดไม่ได้
	0.10	60.13
	0.15	79.68
	0.20	71.08

ตาราง 14 แสดงผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เตรียมได้ต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

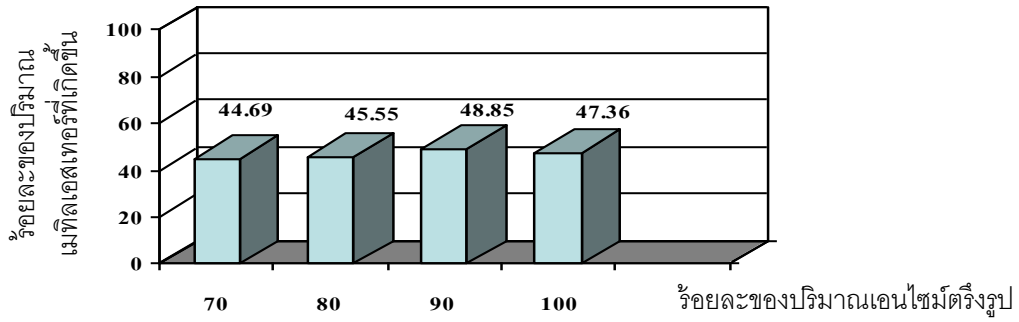
สภาวะที่ทดลอง	ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูปที่เตรียมได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น
สภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย - น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1 : 4 โมล/โมล - เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส - เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที - เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง	70 80 90 100	44.69 45.55 48.85 47.36

จากตาราง 13 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระกับปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากตาราง 14 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกับปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 39



ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากภาพประกอบ 38 และ 39 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ตรึงรูปในช่วงแรกร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด ที่ร้อยละของปริมาณเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปค่าหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มร้อยละของปริมาณเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปอีก ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งจะพบแนวโน้มร้อยละของปริมาณเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปที่ใช้จะมีปริมาณสูงสุดค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มจากปริมาณนี้แล้วจะทำให้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหมือนกัน ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากเอนไซม์อิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ผลผลิตสูงกว่าเอนไซม์ตรึงรูปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากตาราง 12

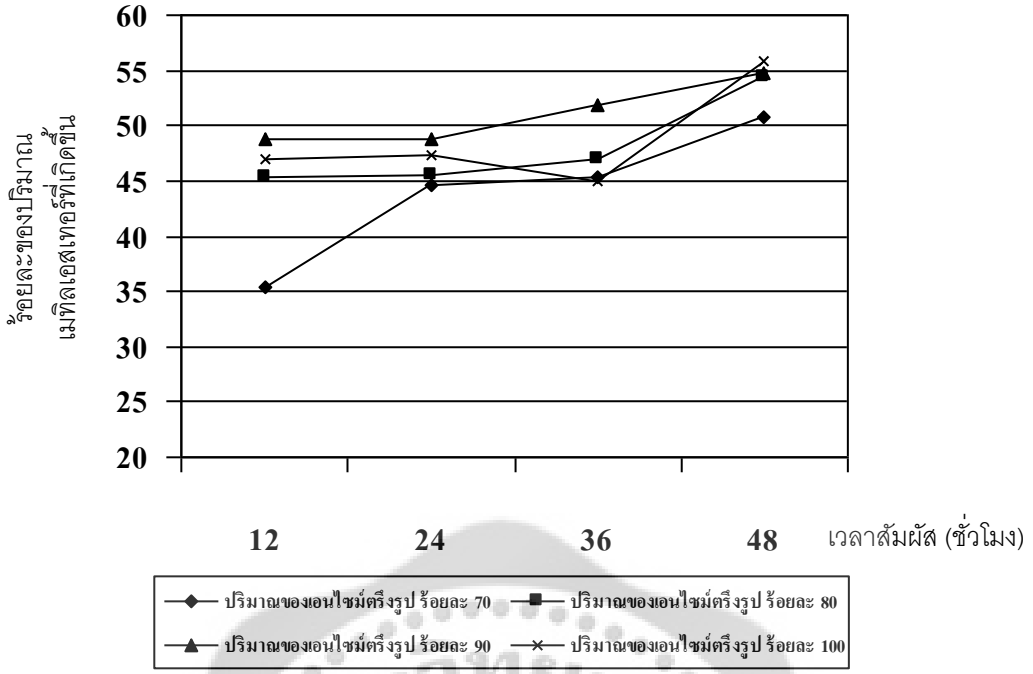
การทดลองที่ 2 ทำการศึกษาปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปและเวลา ซึ่งใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปปริมาณร้อยละ 70, 80, 90 และ 100 เทียบกับน้ำหนักน้ำมันปาล์ม โดยทำปฏิกิริยากับสับสเตรท คือ น้ำมันปาล์มต่อเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมล 1:4 และ มีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาสัมผัส 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงในตาราง 15

ตาราง 15 แสดงผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

สภาวะที่ทดลอง	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจากการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาสัมผัส				
	ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูป	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)			
		12	24	36	48
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย - น้ำมันปาล์มต่อเมทานอลอัตราส่วน 1 : 4 โมล/โมล - เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส - เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที	70	35.38	44.69	45.39	50.74
	80	45.42	45.55	46.94	54.31
	90	48.76*	48.85	51.82	54.75
	100	46.94	47.36	45.01	55.87

หมายเหตุ * นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากข้อมูลในตาราง 15 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกับปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้เอนไซม์ตรึงรูปที่เตรียมได้

จากตาราง 15 และภาพประกอบ 40 พบว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อใช้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ยกเว้นร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากการความสัมพันธ์โดยใช้เวลาสัมผัส 36 ชั่วโมง และร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 100 มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเวลาสัมผัสในช่วงอื่นๆ ในขณะที่ใช้ปริมาณของเอนไซม์เท่ากัน เมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูปกับเวลาสัมผัสที่ส่งผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ด้วยการวิเคราะห์ Paired samples test (t-test) พบว่า ที่เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมงกับร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 (ρ = .031) นั่นหมายความว่า เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมงกับปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปร้อยละ 90 เป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการทดลองดังกล่าวคือ ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ร้อยละ 48.76 ดังนั้น จากผลการทดลองที่ 2 จึงใช้เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง และปริมาณของเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปร้อยละ 90 ไปใช้ในการทดลองที่ 3 ต่อไป

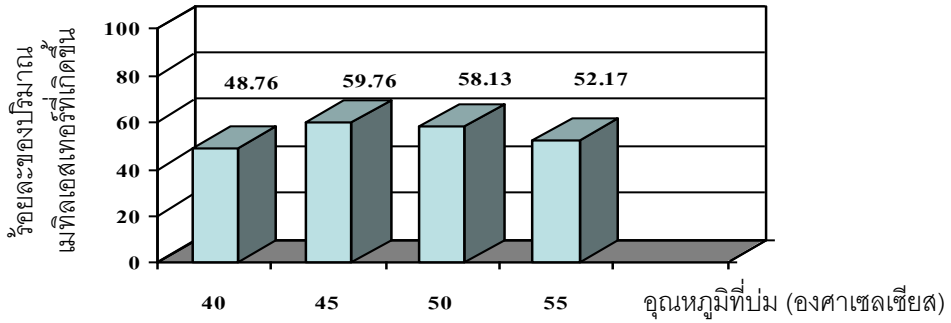
2.3 **การทดลองที่** 3 ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอุณหภูมิ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปในสภาวะที่เหมาะสม จากผลการทดลองที่ 2 คือ ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูป 90 เทียบกับน้ำหนักน้ำมันปาล์ม โดยทำปฏิกิริยากับสับสเตรท คือ น้ำมันปาล์มต่อเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมล 1:4 มีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 40, 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 2 คือ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงในตาราง 16

ตาราง 16 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

สภาวะที่ทดลอง	อุณหภูมิที่บ่ม (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่บ่ม
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย - น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1 : 4 โมล/โมล - เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูป 90 - เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที - เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง	40	48.76
	45	59.76
	50	58.13
	55	52.17

จากตาราง 16 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่บ่มต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากตาราง 16 และภาพประกอบ 41 จะเห็นว่า จากอุณหภูมิที่บ่ม 45 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นสูงสุด ดังนั้น จากการทดลองนี้ จึงใช้อุณหภูมิที่บ่ม 45 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 59.76 ดังนั้น จึงนำผลการทดลองนี้ ไปใช้ในการทดลองที่ 4 ต่อไป

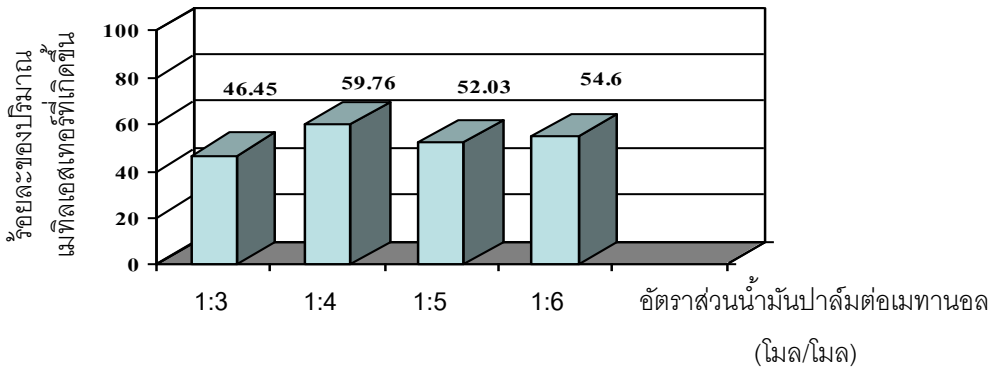
2.4 การทดลองที่ 4 ปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่ 4 การศึกษาผลของปริมาณเมทานอล โดยใช้สับสเตรทที่มีส่วนประกอบน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ในอัตราส่วน 1:3, 1:4, 1:5 และ 1:6 (โมล/โมล) ตามลำดับ โดยใช้ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 2 นั่นคือ 90 เทียบกับน้ำหนักน้ำมันปาล์ม มีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิเหมาะสมจากผลการทดลองที่ 3 คือ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 2 คือ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงในตาราง 17

ตาราง 17 แสดงผลของปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

สภาวะที่ทดลอง	น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน (โมล/โมล)	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจากปริมาณเมทานอล
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย - เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูป 90 - เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที - บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส - เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง	1:3	46.45
	1:4	59.76
	1:5	52.03
	1:6	54.60

จากตาราง 17 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทานอล โดยใช้สับสเตรทที่มีส่วนประกอบน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลกับปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากตาราง 17 และภาพประกอบ 42 จะเห็นว่าอัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล จะได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นสูงสุด ดังนั้น จากการทดลองนี้จึงใช้อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล เป็นสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นสูงสุด ร้อยละ 59.76 ดังนั้น จึงนำผลการทดลองนี้ ไปใช้ในการทดลองที่ 5 ต่อไป

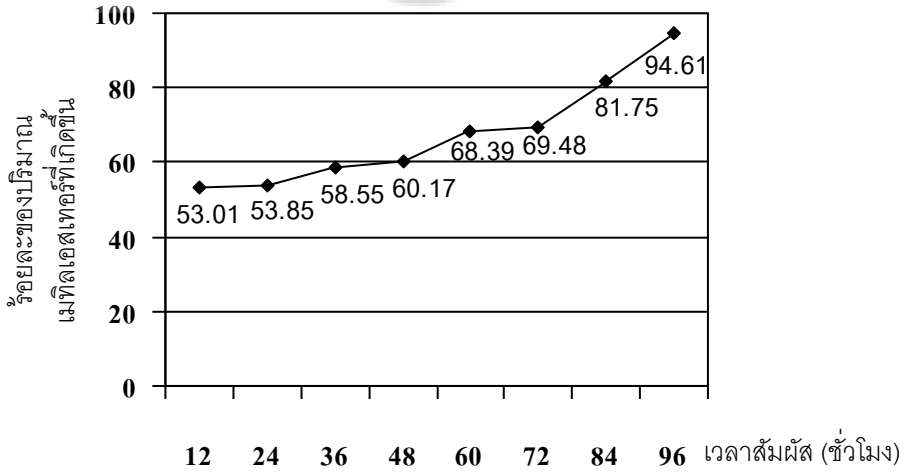
2.5 **การทดลองที่** 5 การผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากผลการทดลองที่ 1-4 สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองที่ 5 ได้ดังนี้คือ ใช้สับสเตรทที่มีส่วนประกอบน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ในอัตราส่วน 1:4 โมล/โมล โดยใช้ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 เทียบกับน้ำหนักน้ำมันปาล์ม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง และเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็น 24, 36, 48, 60, 72, 84 และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตาราง 18

ตาราง 18 แสดงผลผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมกับเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น

สภาวะที่ทดลอง	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น
สภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย - เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร - ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูป 90 - เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที - บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	12	53.01
	24	53.85
	36	58.55
	48	60.17
	60	68.39
	72	69.48
	84	81.75
	96	94.61

จากตาราง 18 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นกับปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากตาราง 18 และภาพประกอบ 43 จะเห็นว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจากสภาวะที่เหมาะสมกับเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็น 96 ชั่วโมง พบว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้คือ 94.61 เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จากการศึกษาผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม จึงนำไบโอดีเซลที่ได้ไปทดสอบคุณภาพ

3. การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล

ในการทดสอบเพื่อหาคุณภาพของไบโอดีเซลที่ได้ผลิตตามสภาวะที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 5 โดยนำไบโอดีเซลตัวอย่าง (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้ ไปวิเคราะห์คุณภาพของไบโอดีเซล ณ ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 เช่น ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด ได้ผลการวิเคราะห์ทดสอบแสดงในตาราง 19

ตาราง 19 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้เทียบกับข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549

คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่วัดได้จากผลการทดลอง	ผลการประเมิน
ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (โดยน้ำหนัก)	≥ 96.5*	94.61	ไม่ผ่านเกณฑ์
ความหนาแน่น (Density) ที่ 15 °C Kg/m^3	860 - 900	900	ผ่านเกณฑ์
ความหนืด (Viscosity) ที่ 40 °C cSt	1.9 - 8.0	28.56	ไม่ผ่านเกณฑ์
จุดวาบไฟ (Flash point) (°C)	> 120	170	ผ่านเกณฑ์
ค่าความเป็นกรด (Acid number)	< 0.80	40	ไม่ผ่านเกณฑ์

* เทียบกับข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ไม่อยู่ในข้อกำหนดของไบโอดีเซลชุมชน

จากตาราง 19 พบว่าไบโอดีเซลที่ได้นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณภาพพื้นฐานเปรียบเทียบกับข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 ของกรมธุรกิจพลังงาน พบว่า คุณสมบัติบางอย่างต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

4. การศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ซ้ำ

จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งสภาวะประกอบด้วยน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ หลังจากนั้นแยกเอนไซม์ตรึงรูปด้วยการกรองแล้วล้างด้วยเฮกเซน 5 มิลลิลิตร และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 5 มิลลิลิตร ทำให้แห้งในระบบสุญญากาศ แล้วนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ใหม่ พบว่าเมื่อนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปไปใช้ซ้ำครั้งที่ 2 การผลิตเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 45.38 ได้ผลการวิเคราะห์แสดงในตาราง 20

ตาราง 20 แสดงเปรียบเทียบผลผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะของการผลิตโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปครั้งแรกกับการใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปซ้ำอีกครั้ง

สภาวะที่ทดลอง	ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
สภาวะที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ประกอบด้วย		
- น้ำมันปาล์มต่อเมทานอลอัตราส่วน 1 : 4 โมล/โมล	94.61	45.38
- เฮกเซน 1 : 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร		
- สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 : 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร		
- บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส		
- เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที		
- เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง		

จากตาราง 20 พบว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นครั้งที่ 2 น้อยกว่าครั้งที่ 1 และมีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นต่ำกว่าร้อยละ 50

5. ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วย

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตในหน่วยราคาบาทต่อลิตร พิจารณาจากต้นทุนผันแปรในการผลิตไบโอดีเซลคือ ค่าวัตถุดิบของน้ำมันปาล์ม ค่าสารเคมี เช่น ค่าใช้จ่ายเมทานอล เฮกเซน เอนไซม์ไลเปส แร่มอนต์มอริลโลไนต์ และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เป็นต้น ส่วนต้นทุนคงที่ คือ เอนไซม์ตรึงรูปที่นำกลับมาใช้งานซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไป

จากการพิจารณาต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือผลรวมของต้นทุนผันแปรและต้นทุนคงที่ แต่ในที่นี้จะไม่คิดต้นทุนคงที่คือ เอนไซม์ตรึงรูปที่นำกลับมาใช้งานซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไป เนื่องจากสามารถใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เตรียมได้เพียงครั้งเดียว

ในการผลิตไบโอดีเซลให้ได้ปริมาณ 1 ลิตรนั้นจะใช้วัตถุดิบ และสารเคมี ดังแสดงรายละเอียดในตาราง 21 ดังนี้คือ

ตาราง 21 แสดงรายการราคาต้นทุนผันแปรของการผลิตไบโอดีเซลต่อลิตร

รายการต้นทุนผันแปรสำหรับผลิตไบโอดีเซล	ราคาต่อหน่วย	ปริมาณที่ใช้	ราคา (บาท)
น้ำมันปาล์ม	15 บาทต่อลิตร	1.2 ลิตร	18.00
เอนไซม์ไลเปสอิสระ	280 บาทต่อกรัม	19.5 กรัม	5,460.00
แร่มอนต์มอริลโลไนต์	2.47 บาทต่อกรัม	958 กรัม	2,366.26
เฮกเซน	276 บาทต่อลิตร	1.065 ลิตร	293.94
เมทานอล	196 บาทต่อลิตร	0.205 ลิตร	40.15
สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์	21.96 บาทต่อลิตร	22 ลิตร	483.12
		ราคาต้นทุนรวม	8,661.47

จากตาราง 21 พบว่าต้นทุนรวมเท่ากับต้นทุนผันแปรในการผลิตไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 8,661.47 บาทต่อลิตร ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากเมื่อเทียบกับการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งมีราคาแพง อีกทั้งเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถใช้ได้แค่ครั้งเดียว ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ จึงส่งผลให้ต้นทุนรวมในการผลิตไบโอดีเซลจึงมีราคาในหน่วยบาทต่อลิตรสูงมาก

บทที่ 5
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ มีจุดมุ่งหมายเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ และศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำกลับมาใช้ผลิตไบโอดีเซลซ้ำ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลและอภิปรายผลได้ดังนี้ คือ

สรุปผลการวิจัย

1. **การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา** การตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งนี้ จะต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวพยุงและการตรึงเอนไซม์บนตัวพยุงด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ ซึ่งในที่นี้ตัวพยุงที่ใช้คือ มอนต์มอริลโลไนต์ และเอนไซม์คือเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa*

ขั้นตอนการเตรียมตัวพยุงคือ จะต้องล้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยน้ำดีไอออไนซ์ด้วยการกวน กรอง อบให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปเผา ในอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น จะได้ตัวพยุงที่พร้อมใช้งาน ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวนวล

ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ โดยนำเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* ซึ่งเป็นเอนไซม์อิสระ (Free enzyme) ตัวพยุง และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 มาผสมเข้ากันแล้ว นำไปเขย่าบนเครื่องกวน เอนไซม์ไลเปสจะถูกตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ กรอง จะได้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป ซึ่งมีลักษณะเป็นผงหยาบ สีขาวนวล

จากการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถหาปริมาณโปรตีนก่อน - หลังการตรึงเอนไซม์ และร้อยละของการตรึงเอนไซม์บนมอนต์มอริลโลไนต์ ปรากฏว่ามีปริมาณโปรตีนเหลือหลังจากผ่านการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ น้อยกว่าปริมาณโปรตีนก่อนการตรึงเอนไซม์ ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย แสดงว่ามีเอนไซม์จำนวนหนึ่งถูกตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถคิดคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของร้อยละของการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 88.88 นั่นคือ ถ้าเริ่มต้นใช้เอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* 28 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ 1 กรัม จะมีเอนไซม์ไลเปสอยู่บนมอนต์มอริลโลไนต์ 1 กรัม เท่ากับ 24.89 มิลลิกรัม หลังจากการผ่านการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

2. **การหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล**

ผลจากการศึกษาผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ โดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล เพื่อเป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งได้ผลจากการทดลองที่ 1-5

การทดลองที่ 1 ผลจากการเปรียบเทียบปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระที่เป็นตัวเร่งคือ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ พบว่าร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระ 0.15 มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดคือ 79.68 ในช่วงร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระ 0.05-0.15 มีแนวโน้มของร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แต่ขณะที่เพิ่มร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระมากขึ้น ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์กลับลดลง

จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เป็นตัวเร่งคือ 70, 80, 90 และ 100 ตามลำดับ พบว่าร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดคือ 48.85 ในช่วงร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 70-90 มีแนวโน้มของร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แต่ขณะที่เพิ่มร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปมากขึ้น ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์กลับลดลง

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในรูปของร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ พบว่าการใช้เอนไซม์ไลเปสอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ผลผลิตสูงกว่าการใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป และร้อยละของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ตรึงรูปค่าหนึ่งๆ ที่ทำให้มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด

การทดลองที่ 2 ผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่เป็นตัวเร่งคือ 70, 80, 90 และ 100 ตามลำดับ พบว่า ที่เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมงกับร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการทดลองดังกล่าวคือ มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 48.76 จากการทดลองที่ 2 นี้ จึงใช้เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง และร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 ไปใช้ในการทดลองที่ 3 ต่อไป

การทดลองที่ 3 ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 บ่มที่อุณหภูมิ 40, 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิที่บ่มที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเมทิลเอสเทอร์คือ 45 องศาเซลเซียส มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 59.76 จึงนำผลการทดลองนี้ไปใช้ในการทดลองที่ 4

การทดลองที่ 4 ผลของปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:3, 1:4, 1:5 และ 1:6 โมล/โมล ตามลำดับ เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง พบว่า อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 เป็นอัตราส่วนเหมาะสมที่สุดในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 59.76 จึงนำผลการทดลองนี้ไปใช้ในการทดลองที่ 5

การทดลองที่ 5 ผลการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมโดยให้เวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200

รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1-4 และเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็น 24, 36, 48, 60, 72, 84 และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสเป็น 96 ชั่วโมง ทำให้มีร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 94.61

3. การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล

จากการนำไบโอดีเซลที่ผลิตจากสภาวะที่ประกอบด้วยน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง โดยนำไบโอดีเซลตัวอย่างที่ผลิตได้ ไปวิเคราะห์คุณภาพ ที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน โดยเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 พบว่า ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 94.61 ความหนาแน่นเท่ากับ 900 Kg/m^3 ความหนืดเท่ากับ 28.56 cSt จุดวาบไฟเท่ากับ 170 $^{\circ}C$ ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 40 พบว่า คุณสมบัติบางอย่างต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

4. การศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ซ้ำ

จากการศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าเมื่อนำเอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ไปใช้ใหม่อีก 1 ครั้ง พบว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 45.38 ซึ่งลดลงมากกว่าร้อยละ 50 จากการผลิตไบโอดีเซลครั้งแรกที่ได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 94.61 จึงยุติการนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับไปใช้ใหม่ แสดงเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปสามารถใช้ได้แค่ 1 ครั้งเท่านั้น ไม่สามารถนำกลับไปใช้ครั้งต่อไปได้

5. ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วย

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตในหน่วยราคาบาทต่อลิตร พบว่าต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 8,661.47 บาทต่อลิตร โดยพิจารณาจากต้นทุนผันแปรในการผลิตไบโอดีเซลคือ ค่าวัตถุดิบของน้ำมันปาล์ม ค่าสารเคมี เช่น ค่าใช้จ่ายเมทานอล เฮกเซน เอนไซม์ไลเปส แร่มอนต์มอริลโลไนต์ และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เป็นต้น ส่วนต้นทุนคงที่คือ เอนไซม์ตรึงรูปที่นำกลับมาใช้งานซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไป ไม่ได้นำมาคิดเป็นต้นทุนเพราะว่า เอนไซม์ตรึงรูปนำมาใช้ได้เพียงครั้งเดียว

เมื่อพิจารณาจากสมมติฐานการวิจัยครั้งนี้คือ ผลผลิตไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักไบโอดีเซล มีคุณภาพเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 พบว่า

1. ผลผลิตไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) จากการผลิตตามสภาวะที่เหมาะสม ประกอบด้วย น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล อัตราส่วน 1:4 โมล/โมล เฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 94.61 ของน้ำหนักไบโอดีเซล ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90

2. เมื่อนำไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้ ไปทดสอบคุณภาพเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 โดยค่าที่ได้จาการทดสอบคุณภาพต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 94.61 ความหนาแน่นเท่ากับ 900 Kg/m^3 ความหนืดเท่ากับ 28.56 cSt จุดวาบไฟเท่ากับ 170 $^{\circ}C$ ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 40 พบว่า คุณสมบัติบางอย่างไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549

เมื่อพิจารณาจากความสำคัญของการวิจัยครั้งนี้ พอสรุปได้ดังนี้

1. การนำเอนไซม์ตรึงรูปกลับมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้ซ้ำอีก พบว่า เอนไซม์ตรึงรูปสามารถนำกลับมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลได้จริง แต่เอนไซม์ตรึงรูปมีความเสถียรภาพและคงตัวต่ำ จึงทำให้เกิดร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือเท่ากับ 45.38 เมื่อเทียบกับร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ครั้งแรก จึงไม่นำกลับไปใช้ใหม่ซ้ำในครั้งต่อไป ดังนั้น ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้

2. ลดต้นทุนในการผลิต พบว่า การที่ไม่สามารถนำเอนไซม์ตรึงรูปที่เตรียมได้กลับมาใช้ซ้ำและต่อเนื่องหลายครั้งนั้น เป็นผลทำให้ต้นทุนการผลิตมีราคาสูงมาก อีกทั้งกระบวนการผลิตนั้นมีการใช้สารเคมีหลายชนิด เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับค่ามาตรฐาน ดังนั้น การผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้ยังไม่สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้

3. เป็นแนวทางสำหรับการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นพลังงานทดแทนบางส่วน เพื่อลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันดีเซล และน้ำมันดิบจากต่างประเทศ พบว่า การทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอีก

แนวทางหนึ่งที่สามารถนำน้ำมันพืชมาใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ สามารถนำมาใช้เป็นเป็นพลังงานทดแทนบางส่วนในอนาคตได้

4. เป็นเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร สร้างรายได้ให้กับชุมชน พบว่า สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร นำไปใช้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตรได้ แต่ยังไม่สามารถสร้างรายได้ให้กับชุมชน เพราะว่าการผลิตไบโอดีเซลทั้งระบบในครั้งนี้ ยังไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ไม่สามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงได้

อภิปรายผลการวิจัย

1. **การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา** ด้วยการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

ผลจากการทดลองปรากฏว่า สามารถตรึงเอนไซม์ไลเปสได้ 24.89 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักของมอนต์มอริลโลไนต์ 1 กรัม คิดเป็นร้อยละของการตรึงเอนไซม์เท่ากับ 88.88 สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพนั้น จากทฤษฎีพบว่าองค์ประกอบที่สำคัญ 3 อย่างในการตรึงเอนไซม์ คือ

1. เอนไซม์ที่ใช้คือ เอนไซม์ไลเปสผลิตจากยีสต์ สายพันธุ์ *Candida rugosa* ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นโปรตีน ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายๆ ตัวจับกันแบบลูกโซ่ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา สามารถทำงานได้ดีที่สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ทำงานได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ตัวพยุงในการตรึงคือ มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นสารอนินทรีย์มีหมู่ฟังก์ชันน้อย ส่วนมากมีแต่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มีสูตรทั่วไปคือ $Na_{0.2}Ca_{0.1}Al_2Si_4O_{10}(OH)_2.10H_2O$ มีลักษณะสีขาว มีขนาด 0.01-1.0 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 700-800 m^2/g เป็นแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสามารถให้เอนไซม์ไลเปสเข้าไปยึดเกาะ โดยโครงสร้างพื้นฐานแต่ละหน่วยจะซ้อนกันไม่สนิท มีประจุลบในโครงสร้างมาก มีช่องว่างให้ไอออนบวกบางชนิดแทรกเข้าไปได้ เพื่อทำหน้าที่ยึดชั้นของแร่เอาไว้ สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนของสารอินทรีย์ สามารถดูดยึดไอออนบวกไว้ได้มากทั้งบนผิวภายนอกและในช่องว่าง

ขั้นตอนการเตรียมตัวพยุง ตัวพยุงจะต้องผ่านการเผาและอบ เพื่อกำจัดน้ำในโครงสร้างผลึก (Chemical combine water) ให้หมดไป ทำให้ตัวพยุงไม่เกิดการหดตัว ลักษณะตัวพยุงที่ได้คือ ผงละเอียด สีขาวนวล

3. วิธีการตรึงเอนไซม์เข้ากับตัวพยุงนั้นๆ คือ การตรึงเอนไซม์วิธีดูดซับทางกายภาพ โดยนำเอนไซม์ไลเปสไปจับกับพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยแรงดึงดูด

ระหว่างประจุ โดยการดูดซับไอออนผ่านประจุบวกของโปรตีนผ่านหมู่อะมิโน (NH_2) และหมู่ silanol (SiH_3OH) ที่เหลือบนตัวพยุง การตรึงวิธีดูดซับทางกายภาพนี้ไม่ซับซ้อน และภาวะการตรึงไม่รุนแรง แต่แรงดึงดูดระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุงไม่ค่อยแข็งแรง เกิดการสูญเสียแอคติวิตีบางส่วนของเอนไซม์ในขั้นตอนการตรึง เอนไซม์อาจหลุดออกจากตัวพยุง

ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพนั้น โดยเอนไซม์ไลเปสจะถูกตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ จะได้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป ซึ่งมีลักษณะเป็นผงหยาบ สีขาวนวล หาปริมาณโปรตีนก่อน - หลังการตรึงเอนไซม์ในรูปของสารละลาย โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายโปรตีน BSA ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่ายังมีปริมาณโปรตีนหลงเหลืออยู่ แสดงว่ามีเอนไซม์บางส่วนเท่านั้นที่ถูกดูดซับบนตัวพยุง เพราะว่าบริเวณพื้นผิวนอกและพื้นผิวภายในของตัวพยุงบางส่วน เอนไซม์ไม่สามารถดูดซับไอออนผ่านประจุได้ อีกทั้งตัวพยุงอาจมีประจุลบสำหรับดูดซับในจำนวนจำกัด

ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของฟองเต และคนอื่นๆ (Isidoro Emilio de Fuentes; et al. 2001: 659) ที่ทำการตรึงเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida cylindracea* (CCL) ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพบนมอนต์มอริลโลไนต์ ที่พีเอช 7 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละของการตรึงเอนไซม์เท่ากับ 87

2. สภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

การออกแบบการทดลองเบื้องต้น ทางผู้วิจัยได้ศึกษาทดลองถึงปัจจัยต่างๆ จนสามารถกำหนดสภาวะของปัจจัยต่างๆ ที่จะส่งผลให้เกิดเป็นผลผลิตไบโอดีเซล หลังจากนั้นทางผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรให้มีค่าต่างๆ ศึกษาว่าจะส่งผลให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลไปในทิศทางใด จนสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การทดลองที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

ผลจากการทดลองปรากฏว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ตรึงรูปในช่วงแรกมีค่ามากขึ้น ก็จะทำให้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ตรึงรูปที่มากเกินไป พบว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์กลับลดลงเล็กน้อย แสดงว่าปริมาณของเอนไซม์แปรผันตามปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อสับสเตรทคงที่ และเมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์สูงกว่าระดับที่เร่งปฏิกิริยาพอดีกับสับสเตรท อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มคงที่ เพราะไม่มีสับสเตรทเหลืออีกแล้ว แต่ถ้าใส่ปริมาณเอนไซม์มากเกินไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาอาจจะลดลง มีผลทำให้สารละลายในปฏิกิริยามีความหนืดสูง เกิดการรวมตัวกันของเอนไซม์ และมี

การถ่ายเทมวลลดลง คือ ทำให้สับสเตรทที่เข้าทำปฏิกิริยาไม่สามารถเข้าถึงบริเวณเร่งของเอนไซม์ได้ ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของชาห์ และคุปตะ (Shweta Shah; & Munishwar N. Gupta. 2007: 411) เมื่อใส่ปริมาณของเอนไซม์ 12.5-75 มิลลิกรัม ต่อน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ 0.5 กรัม ปริมาณของเอทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มสูงขึ้น หลังจากใส่ปริมาณเอนไซม์ 100 มิลลิกรัมต่อน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ 0.5 กรัม ปริมาณของเอทิลเอสเทอร์กลับลดลงเล็กน้อย

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์อิสระมีค่ามากกว่าเอนไซม์ตรึงรูป เพราะว่าเอนไซม์อิสระไม่ผ่านขั้นตอนการตรึงจึงไม่เกิดการสูญเสียแอคติวิตี แต่สำหรับเอนไซม์ตรึงรูปมีการสูญเสียแอคติวิตีบางส่วนของเอนไซม์ในขั้นตอนการตรึงถูกกระทบกระเทือนจากการยึดโมเลกุลของเอนไซม์กับตัวพยุง แอคติวิตีของเอนไซม์จึงเบี่ยงเบนไปจากเดิมในลักษณะลดลง เป็นผลสืบเนื่องจากโครงรูปของเอนไซม์เปลี่ยนไปอย่างไม่เหมาะสม เพราะว่าตัวพยุงอาจจะไปดึงน้ำออกจากเอนไซม์ มีผลทำให้เอนไซม์เสียสภาพ โครงรูปเปลี่ยนไป ซึ่งจะส่งผลต่อบริเวณเร่งที่ใช้ในการจับสับสเตรท ทำให้แอคติวิตีของเอนไซม์ลดน้อยลง ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของดุษฎี รัตนพระ (2549: 65) จากการศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลเปสจาก *Pseudomonas fluorescens* โดยวิธีการดูดซับทางกายภาพบนไคโตซาน พบว่าแอคติวิตีของเอนไซม์ที่ถูกตรึงมีค่าต่ำกว่าแอคติวิตีของเอนไซม์อิสระ

อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์ตรึงรูปนั้น เหมาะสำหรับเอนไซม์ที่หาได้ยาก และมีราคาสูงในการผลิต เมื่อผ่านการตรึงยังคงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ ทำให้เอนไซม์ตรึงรูปสามารถนำเอนไซม์ตรึงรูปกลับมาใช้ซ้ำและต่อเนื่องกันหลายครั้ง สามารถแยกสารผลิตภัณฑ์ออกได้ง่าย ถึงแม้ว่าเอนไซม์อิสระจะมีแอคติวิตีที่สูงกว่า แต่สามารถใช้ได้ครั้งเดียว เอนไซม์อิสระจะผสมปนลงไปในสารละลายของสับสเตรทและผลิตภัณฑ์ ทำให้แยกออกไม่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกเอนไซม์ตรึงรูปมาใช้ในการทดลองเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัสและปริมาณของเอนไซม์ตรึงรูปต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

ผลจากการทดลองปรากฏว่า ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อใช้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ยกเว้นร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากการความสัมพันธ์โดยใช้เวลาสัมผัส 36 ชั่วโมงกับร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 100 ที่ใช้ มีค่าลดลงเล็กน้อย สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ถ้าให้สับสเตรททำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่ระยะเวลาต่างๆ กันแล้ววัดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะได้ผลดังนี้คือ ในช่วงแรกๆ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา แล้วต่อไปการเกิดผลิตภัณฑ์จะช้าลงและไม่แปรผันโดยตรงกับเวลา การที่เป็น

เช่นนี้อาจเกิดจากการมีสับสเตรทจำกัด หรือ อัตราการสร้างผลิตภัณฑ์ถึงสมดุล หรือเกิดจากการยับยั้งโดยผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (ศิริรัตน์ สาระเวก. 2528: 33) ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของลารา และ ปาร์ค (P. Vanessa Lara; & Enoch Y. Park. 2004: 273) ศึกษาผลของเวลาและปริมาณเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida cylindracea* ต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้สารตั้งต้นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการดูดซับจากดินต่อเมทานอล โดยใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปส 12, 24, 59, 119, 178, 238, 356 และ 475 ยูนิต เป็นเวลาสัมผัส 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณเอนไซม์ 59 ยูนิต สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้มากกว่าร้อยละ 60 ภายใน 4 ชั่วโมง แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้กลับไม่มีความสัมพันธ์กับเวลา ดังนั้นจึงต้องศึกษาปริมาณเอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมและไม่เกิดการสิ้นเปลืองโดยไม่จำเป็น โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของร้อยละของปริมาณเอนไซม์ตรึงรูปกับเวลาสัมผัสที่ส่งผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ด้วยการวิเคราะห์ Paired samples test (t-test) พบว่า ที่เวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง กับร้อยละของปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป 90 มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

ผลจากการทดลองปรากฏว่า อุณหภูมิที่บ่ม 45 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นสูงสุด ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการทดลองเพื่อผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นแต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างที่ทำปฏิกิริยา ถ้าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาต่ำลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาเคมีต่างๆ จะทำงานได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เพราะต้องการพลังงานในการกระตุ้น การเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ก็เช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารประกอบโปรตีนมักจะไม่ค่อยคงตัวต่อความร้อน ทำให้เสียสภาพที่อุณหภูมิสูง ซึ่งความร้อนจะให้พลังงานที่ทำให้อะตอมในโมเลกุลของโปรตีนสั่นรวดเร็วยิ่งขึ้น จนสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนและพันธะไฮโดรโฟบิกที่ไม่แข็งแรงได้ เอนไซม์เมื่อถูกทำให้เสียสภาพ จะเสียความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเอนไซม์ทุกตัวจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานต่างกัน ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของชอว์ และคนอื่นๆ (Ping Shao; et al. 2008: 283) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* ที่ถูกตรึงบนไคโตซาน คือ 45 องศาเซลเซียส สามารถเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์สูงสุดมากกว่าร้อยละ 95

การทดลองที่ 4 ศึกษาปริมาณเมทานอลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

ผลจากการทดลองปรากฏว่า อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล จะได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นสูงสุด 59.76 โดยตามทฤษฎีสัดส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์จะเท่ากับ 1:3 แต่ ในทางปฏิบัติจะต้องให้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าตามทฤษฎี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แต่การใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากในการทดลองที่ใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากลับทำให้เอนไซม์เสียสภาพ เพราะแอลกอฮอล์ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารประกอบโปรตีนได้ และจะทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสารประกอบโปรตีน เพราะเกิดการดึงน้ำมาไว้ในตัวแอลกอฮอล์ ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของกามินิ และ เลอฟูจิ (N.R. Kamini; & H. Iefuji. 2001: 409) ได้ทำการศึกษาผลของเมทานอลต่อปฏิกิริยาเมทาโนไลซีสของน้ำมันรำข้าวโดยใช้สารตั้งต้นที่มีส่วนผสมระหว่างน้ำมันรำข้าวและเมทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 และ 1:6 โดยใช้เอนไซม์ไลเปสจาก *Cryptococcus spp*. S-2 และใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 80 ของน้ำหนักสารตั้งต้น พบว่า ที่เวลา 120 ชั่วโมงเมื่อใช้สารตั้งต้นที่มีส่วนผสมระหว่าน้ำมันรำข้าวและเมทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:4 สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้สูงถึงร้อยละ 80.7 และเมื่อใช้สารตั้งต้นที่มีส่วนผสมระหว่างน้ำมันรำข้าวและเมทานอล อัตราส่วนโดยโมลเป็น 1:6 จะผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ต่ำ เนื่องจากปริมาณเมทานอลสูงเกินไปทำให้เอนไซม์เสียสภาพ

การทดลองที่ 5 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

ผลจากการทดลองปรากฏว่า อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4 โมล/โมล ใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูปปริมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์ม เฮกเซน ปริมาณที่ใช้คือ เฮกเซน 1: 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ บ่มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ร้อยละ 94.61 โดยเทียบน้ำหนักไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ผลิตได้นั้น เป็นไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ซึ่งเป็น 1 ใน 3 แบบของไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ระหว่างน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ กับเมทิลแอลกอฮอล์ (เมทานอล) เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบกลีเซอไรด์ที่อยู่ในน้ำมันปาล์ม เพื่อให้เกิดสารประกอบเอสเทอร์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้เอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ (ester bond) ในน้ำมันให้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride) ไดกลีเซอไรด์

(diglyceride) และกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) มีเฮกเซนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อลดการสัมผัสระหว่างเอนไซม์ไลเปสกับเมทิลแอลกอฮอล์โดยตรง และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 เป็นตัวควบคุมค่าพีเอช เพราะว่าเอนไซม์จะทำงานได้ในช่วงพีเอชช่วงหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นเวลาที่เกิดกรดหรือเบสขึ้นมาจากปฏิกิริยา สารละลายบัฟเฟอร์จะคอยช่วยปรับค่าพีเอชให้กลับสู่สภาพปกติที่เอนไซม์จะทำงานได้ต่อไป บ่มที่อุณหภูมิเหมาะสม เพื่อให้เอนไซม์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เขย่าด้วยความเร็วรอบคงที่ การใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมช่วยให้การกระจายของเอนไซม์และการสัมผัสกับสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้ดี เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสม เพื่อให้อัตราส่วนน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการสัมผัสกัน จนเกิดเป็นสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) อยู่ชั้นบน และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้อยู่ชั้นล่าง หลังจากนั้นแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกเพื่อนำไปใช้ซ้ำในครั้งต่อไป ผลจากการทดลองที่ได้ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดลองของศิริรัตน์ โรจนพิพัฒน์กุล และ วศินี พุมมา (2548: บทคัดย่อ) ได้ทำการศึกษาการทำทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเกลือของโลหะบนมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalytic reaction) สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ออกจากกัน และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก, การทดลองของปรเมษฐ์ น่วมเปี่ยม และสินศุภา จุ้ยจุลเจิม (2549: บทคัดย่อ) ได้ทำการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสเพื่อทำการย่อยไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันชนิดต่างๆ พบว่าเอนไซม์อิสระให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์อิสระสูงกว่าเอนไซม์ตรึงรูปและน้ำล้างจากการตรึงรูปของเอนไซม์ 3-4 เท่า ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ความเร็วรอบของการเขย่า 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, การทดลองของเกียซี่ และคนอื่นๆ (M. Ghiaci; et al. 2009: 293) ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อค่าแอคคิวิตีของเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* ในรูปของเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปบนโซเดียม-เบนโทไนต์ พบว่าสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ให้ร้อยละของค่าแอคติวิตีของเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปมีค่าสูงสุดคือ ร้อยละ 81.9 และ 7.2 ตามลำดับ, การทดลองของดุษฎี รัตนพระ. (2549: 71) ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ พบว่าเฮกเซนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ ร้อยละ 16.48 เมื่อใช้เฮกเซนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล 1:3 ปริมาณเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปร้อยละ 100 โดยน้ำหนักน้ำมัน ไม่มีน้ำในปฏิกิริยา อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเฮกเซน เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้ดี และนอกจากยังไม่มีผลกระทบต่อโครงรูปของเอนไซม์, การทดลองของชอว์ และคนอื่นๆ (Ping Shao; et al. 2008: 283) ทำการศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* สำหรับเป็นตัวเร่งในการผลิตไบโอดีเซลจากไขสบู่เมล็ดเรดซีฟ พบว่าใช้สารตั้งต้นที่มีส่วนผสมระหว่างไขสบู่เมล็ดเรดซีฟและ

เมทานอล อัตราส่วนโดยโมล 1:4 โดยใช้เอนไซม์ไลเปสจาก *Candida rugosa* ที่ถูกตรึงบนไคโตซานด้วยวิธีเชื่อมไขว้ ปริมาณเอนไซม์ร้อยละ 8 ปริมาณน้ำร้อยละ 6 ของน้ำหนักสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้สูงมากกว่าร้อยละ 95, การทดลองของเชิดศักดิ์ เมธาธไนศวรรย์ (2535: 45) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราเร็วในการเขย่าสารละลายต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรโอเลโออิลกลีเซอรอลกับกรดสเตียริกโดยใช้เอนไซม์ไลเปสจาก *Candida cylindracea* พบว่า ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ทำให้การกระจายตัวของเอนไซม์และการสัมผัสสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้ดี ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ 34.76 และถ้าใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นการเขย่าด้วยแรงเหวี่ยงความเร็วสูงมากเกินไปทำให้เอนไซม์ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าส่วนของเหลวมารวมกันที่บริเวณจุดศูนย์กลาง ในขณะที่ส่วนของเหลวถูกเหวี่ยงไปอยู่ด้านนอกขอบของขวดทำปฏิกิริยา จึงมีผลให้การเกิดปฏิกิริยาลดลง ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ 25.18, การทดลองของกามินิ และ เลอฟูจิ (N.R. Kamini; & H. Iefuji. 2001: 409) ผลของเวลาต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์ พบว่าเมื่อใช้สารตั้งต้นน้ำมันรำข้าวต่อเมทานอล 1:4 ร้อยละของปริมาณน้ำ 80 ของน้ำหนักสารตั้งต้น ปริมาณเอนไซม์ 2000 ยูนิต อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้เวลาสัมผัส 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง พบว่า ที่เวลาสัมผัส 120 ชั่วโมง เกิดร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด 80.7 ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นแปรผันตามเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น

3. การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพไบโอดีเซลมีหลายปัจจัยด้วยเช่น คุณภาพของวัตถุดิบ องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืช กระบวนการผลิต และวัสดุที่ใช้ในการผลิต การจัดการหลังการผลิต เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมั่นใจและปลอดภัยต่อชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องยนต์ ดังนั้นหลังจากนำไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้ ไปทดสอบคุณภาพเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 จะสะท้อนถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพไบโอดีเซล โดยค่าที่ได้จากการทดสอบคุณภาพต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ คือ

ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 94.61 แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มาตรฐานในเชิงพาณิชย์กำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ชี้บอกถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

ความหนาแน่นเท่ากับ 900 Kg/m^3 ยิ่งมีค่ามากยิ่งให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมัน

ความหนืดเท่ากับ 28.56 cSt ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ เป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

จุดวาบไฟเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ เพื่อความปลอดภัย

ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 40 ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุน้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์

สรุปภาพรวมของคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในการวิจัยครั้งนี้ พบว่า คุณสมบัติบางอย่างไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 ดังนั้นจะต้องปรับปรุงแก้ไขปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพไบโอดีเซลเช่น คุณภาพของวัตถุดิบ องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืช กระบวนการผลิต และวัสดุที่ใช้ในการผลิต การจัดการหลังการผลิต ในอนาคต

4. การศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ซ้ำ

ผลจากการทดลองปรากฏว่า จากการศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูป โดยนำเอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ เรียกว่าเอนไซม์ไลเปสตรึงรูป มาใช้เป็นตัวเร่งในการผลิตไบโอดีเซลครั้งแรก ได้ร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 94.61 สามารถแยกเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปในการผลิตไบโอดีเซลจากครั้งแรกที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว นำกลับมาใช้ซ้ำอีก 1 ครั้ง พบว่าร้อยละของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 45.38 ซึ่งลดลงมากกว่าร้อยละ 50

ปกติเราสามารถแยกเอนไซม์ตรึงรูปกลับมาใช้งานได้อีกหลายครั้งจนกว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์จะลดต่ำลงมาก ทำให้ประหยัดกว่าการใช้เอนไซม์อิสระ แต่ผลจากการทดลองพบว่าเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปไม่สามารถนำกลับไปใช้ครั้งต่อไปได้ เพราะว่าในการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้งใช้เวลาสัมผัสนาน ทำให้เอนไซม์มีโอกาสหลุดออกจากตัวพยุง ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวอ่อน ทำให้เอนไซม์ที่ตรึงด้วยวิธีนี้จะมีแอคติวิตีสูงในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาและแอคติวิตีจะลดลงตาม

ระยะเวลาของการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีข้อดีคือวิธีการเตรียมที่มีความสะดวกและสภาวะไม่รุนแรง ต้นทุนการตรึงต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ในอนาคตต้องปรับปรุงเอนไซม์ตรึงรูปให้มีความเสถียรภาพต่อไป

5. ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วย

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตในหน่วยราคาบาทต่อลิตร พบว่าต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 8,661.47 บาทต่อลิตร โดยพิจารณาจากต้นทุนผันแปรในการผลิตไบโอดีเซลคือ ค่าวัตถุดิบของน้ำมันปาล์มเท่ากับ 18.00 บาท และราคาค่าสารเคมี เช่น ค่าใช้จ่ายเมทานอล เฮกเซน เอนไซม์ไลเปส แร่มอนต์มอริลโลไนต์ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เท่ากับ 8,643.47บาท ส่วนต้นทุนคงที่คือ เอนไซม์ตรึงรูปที่นำกลับมาใช้งานซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไป ไม่ได้นำมาคิดเป็นต้นทุนเพราะว่าเอนไซม์ตรึงรูปนำมาใช้ได้เพียงครั้งเดียว

จากผลการคิดราคาต้นทุนในการผลิต ทำให้ทราบราคาต้นทุน ทำอย่างไรไม่ให้เกิดภาวะขาดทุน ซึ่งราคาต้นทุนมีประโยชน์คือ สามารถตั้งราคาขายได้และรู้ได้ว่าจะทำกำไรเท่าไร สามารถรู้ว่ารายการใดที่ก่อให้เกิดราคาต้นทุนมาก และจะลดราคาต้นทุนลง เพื่อให้ได้กำไรเพิ่มมากขึ้นได้หรือไม่ รู้ถึงราคาต้นทุนวัตถุดิบแต่ละอย่าง เพื่อนำไปปรับปรุงและวางแผนการในการผลิตเพิ่มขึ้นได้ ทำให้ทราบว่าต้นทุนวัตถุดิบแต่ละอย่างในการผลิตไบโอดีเซลครั้งนี้ จะต้องมีการวางแผนปรับปรุงการผลิตในอนาคต โดยหาวัตถุดิบมาแทนน้ำมันปาล์ม เช่น น้ำมันพืชใช้แล้วซึ่งมีต้นทุนถูกกว่า เอนไซม์ไลเปสที่ใช้ต้องสั่งจากต่างประเทศมีราคาแพง ควรจะต้องผลิตเอนไซม์ไลเปสใช้เองในระดับอุตสาหกรรม หาวิธีการตรึงเพื่อให้เอนไซม์ตรึงรูปสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้งและต่อเนื่อง สามารถลดต้นทุนการผลิตได้

เมื่อพิจารณาจากความสำคัญของการวิจัยครั้งนี้ สามารถอภิปรายผลดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การนำเอนไซม์ตรึงรูปกลับมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้ซ้ำอีก พบว่า เอนไซม์ตรึงรูปสามารถนำกลับมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำในการผลิตไบโอดีเซลได้จริง แต่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ตรึงรูปลดต่ำลงมาก เพราะว่าเอนไซม์ตรึงรูปมีความเสถียรภาพและคงตัวต่ำ สรุปได้ว่าจะต้องหาวิธีการตรึงเอนไซม์วิธีอื่นๆ มาทดแทนการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งสมรรถนะยังไม่ดีเท่าที่ควร สามารถใช้ได้แค่ครั้งเดียว จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ จึงทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยครั้งนี้ ในอนาคตหากสามารถทำให้เอนไซม์ตรึงรูปมีความเสถียรภาพและคงตัวมากกว่านี้ ใช้งานได้หลายครั้งและต่อเนื่องกัน จะทำให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในเรื่องของราคาสารเคมีที่ใช้ทำตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะว่าต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลในแต่ละครั้งจะคิดรวมต้นทุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

2. ลดต้นทุนในการผลิต พบว่า ต้นทุนของไบโอดีเซลในหน่วยบาทต่อลิตรนั้นสูงกว่าราคาขายของไบโอดีเซลตามท้องตลาด แสดงว่าต้นทุนผันแปรและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์นั้น ยังไม่ประสบผลสำเร็จตามที่คาดหวังไว้ วิธีการนี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้ผลิตไบโอดีเซล จะต้องมีปรับปรุงกระบวนการผลิตอีกหลายด้าน เช่น การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง กระบวนการผลิตมีการใช้สารเคมีหลายชนิด ทำให้ต้นทุนสูง และระยะเวลาในการผลิตต่อครั้งนานเกินไป ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในเรื่องราคา

3. เป็นแนวทางสำหรับการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นพลังงานทดแทนบางส่วน เพื่อลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันดีเซล และน้ำมันดิบจากต่างประเทศ พบว่า การทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำน้ำมันพืชมาใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ สามารถนำมาใช้เป็นเป็นพลังงานทดแทนบางส่วนในอนาคตได้ ถ้าราคาน้ำมันดีเซลและน้ำมันดิบมีราคาสูงมาก สามารถนำวิธีนี้กลับมาผลิตไบโอดีเซลพึ่งพาตัวเองได้

4. เป็นเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร สร้างรายได้ให้กับชุมชน พบว่า สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร นำไปใช้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตรและเครื่องยนต์ที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่ยังไม่สามารถสร้างรายได้ให้กับชุมชน เพราะว่าการผลิตไบโอดีเซลทั้งระบบในครั้งนี้ ยังไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ไม่สามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงได้ หากในอนาคตสามารถพัฒนาต่อยอดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากการวิจัยในครั้งนี้ได้สำเร็จ ก็จะเป็นโอกาสในการสร้างรายได้ให้กับชุมชนได้อีกทางหนึ่ง

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้ไม่เป็นไปตามสมมติฐานในการเทียบเคียงคุณภาพผลผลิตไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้กับค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 จึงเสนอแนวทางในการนำไบโอดีเซลในการวิจัยครั้งนี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ และข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ควรนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในการทำวิจัยครั้งนี้ไปใช้ในรูปของไบโอดีเซลลูกผสม โดยผสมไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับความหนืด และค่าความเป็นกรด ที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าจะนำไปใช้กับเครื่องยนต์ประเภทใดได้บ้าง ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตาราง 22 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลลูกผสมในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนของน้ำมันผสมโดยปริมาตร		ความหนืด	ค่าความเป็นกรด
ไบโอดีเซลที่ผลิตได้	น้ำมันดีเซล	ที่ 40 °C cSt	
70	30	11.87	21.26
60	40	9.36	17.22
50	50	7.90	15.77
40	60	6.41	12.05
30	70	4.89	10.31

จากตาราง 22 พบว่า เมื่อผสมไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 ทำให้ไบโอดีเซลลูกผสมมีค่าความหนืดต่ำ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน และพบว่าเมื่อผสมไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ ทำให้ค่าความกรดลดลงแต่ยังมีค่าความเป็นกรดมากกว่า 0.08 จึงยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ดังนั้นทางผู้วิจัยแนะนำว่าควรเอาไบโอดีเซลลูกผสมในอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับน้ำมันดีเซลคือ 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 มีค่าความหนืดอยู่ในเกณฑ์ 1.9 - 8.0 cSt แต่ยังมีค่าความเป็นกรดสูงอยู่ ไปใช้ประโยชน์กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีลูกสูบทำด้วยเหล็กหล่อชนิดพิเศษมีส่วนผสมของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้เป็นอย่างดี เช่น เครื่องยนต์เรือเดินสมุทร เครื่องยนต์เรือประมง เป็นต้น

2. ควรมีการศึกษาการผลิตเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปใช้เองภายในประเทศ เพื่อลดการนำเข้าเอนไซม์ที่ผลิตจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง โดยรัฐบาลมีนโยบายให้สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) ส่งเสริมการลงทุนของภาคเอกชน เพื่อผลิตเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปภายในประเทศอย่างจริงจังในระดับอุตสาหกรรม ทำให้ราคาต้นทุนของเอนไซม์ไลเปสอิสระและเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปอยู่ในช่วงราคา 1 - 5 บาทต่อกรัม ซึ่งจะถูกกว่าของต่างประเทศประมาณ 60 เท่า เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนผลิตไบโอดีเซล สามารถลดต้นทุนการผลิต

3. เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยมีแหล่งของดินเบนทอไนท์ ซึ่งพบมากในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียมเบนทอไนท์ ซึ่งมีแร่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบอยู่ ดังนั้นหากทางรัฐบาลส่งเสริมในระดับอุตสาหกรรมมีการแยกแร่ออกจากดินและทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ก็สามารถนำมาทดแทนแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ เพราะว่าต้นทุนของดิน

เบนทอไนท์เท่ากับ 2 บาทต่อกิโลกรัม หากนำมาผ่านกระบวนการแยกแร่และทำให้บริสุทธิ์ในระดับอุตสาหกรรม ทำให้ราคาต้นทุนอยู่ในช่วง 4-5 บาทต่อกิโลกรัม จะถูกกว่าของต่างประเทศประมาณ 400 เท่า เพื่อนำมาใช้เป็นตัวพยุง สามารถลดต้นทุนการผลิต

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

การผลิตไบโอดีเซลในการทำวิจัยครั้งต่อไปจะทำอย่างไร เพื่อให้ปัจจัยของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การนำกลับมาใช้ซ้ำ สามารถลดต้นทุนการผลิต เพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตร และลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันดีเซลได้ โดยมีรายละเอียดในข้อเสนอแนะดังนี้

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนการตรึงเอนไซม์บนดินเบนทอไนท์ซึ่งมีแร่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบที่มีแหล่งผลิตภายในประเทศ เพื่อใช้ทดแทนกัน ดังนั้นถ้าสามารถแยกแร่มอนต์มอริลโลไนต์ออกจากดินเบนทอไนท์ให้มีความบริสุทธิ์ได้ สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ลดต้นทุนการผลิต

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของวิธีการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีอื่นๆ นอกเหนือจากการตรึงด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ เช่น การตรึงแบบการห่อหุ้มในเจล (Entrapment) การเชื่อมไขว้ (Cross-linking) การจับแบบโควาเลนต์ (Covalent binding) การห่อหุ้มในแคปซูลขนาดเล็ก (Encapsulation) เพื่อให้เอนไซม์มีเสถียรภาพมากขึ้นกว่าเดิม นำเอนไซม์กลับมาใช้ซ้ำและต่อเนื่องกันได้หลายครั้ง สามารถลดต้นทุนการผลิต

3. ควรมีการนำน้ำมันที่ใช้แล้ว หรือวัตถุดิบอื่นๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีต้นทุนถูกกว่าการนำน้ำมันปาล์มดิบมาใช้โดยตรง สามารถลดต้นทุนการผลิต และเป็นการเพิ่มมูลค่า

4. การทำวิจัยในครั้งนี้มีการนำเข้าวัตถุดิบและสารเคมีจากต่างประเทศ จึงทำให้ต้นทุนต่อหน่วยสูงมาก หากในการวิจัยครั้งต่อไปต้องการศึกษาเพิ่มเติม ควรคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วยว่าจะใช้สิ่งใดมาทดแทน สามารถหาภายในประเทศได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคต

ตารางสรุปภาพรวมของการวิจัย

เรื่อง การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ในแต่ละด้าน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อเสนอแนะ/ปรับปรุง
1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การตรึงเอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ	1. สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ 2. วิธีการตรึงมีความสะดวกไม่ซับซ้อน 3. สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์คือ ไบโอดีเซลได้	1. ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ 2. มีความเสถียรภาพและคงตัวต่ำ 3. ต้นทุนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสูง เพราะว่านำกลับมาใช้ซ้ำไม่ได้ จึงไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ 4. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีนี้ ยังต้องมีการปรับปรุง	1. ปรับปรุงวิธีการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การตรึงแบบการห่อหุ้มในเจล การเชื่อมไขว้ การจับแบบโควาเลนต์ การห่อหุ้มในแคปซูลขนาดเล็ก เพื่อให้เอนไซม์มีเสถียรภาพมากขึ้นกว่าเดิม นำเอนไซม์กลับมาใช้ซ้ำและต่อเนื่องกันได้หลายครั้ง 2. สนับสนุนให้หน่วยงานหรือโรงงานอุตสาหกรรมทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตเอนไซม์ไลเปส แร่มอนต์มอริลโลไนต์จากดินเบนทอไนต์ในระดับอุตสาหกรรม เพื่อนำไปสู่การผลิตเพื่อเป็นการค้า และสามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปที่มีความเสถียรภาพ สามารถใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ ลดการนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาต้นทุนต่ำ

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อเสนอแนะ/ปรับปรุง
2. สภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	1. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 2. กระบวนการผลิต สามารถผลิตไบโอดีเซลได้จริง	1. การผลิตไบโอดีเซลมีการใช้สารเคมีหลายชนิด ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง 2. การผลิตไบโอดีเซลในแต่ละครั้งใช้เวลานาน 3. กระบวนการผลิตยังเกิดปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์	1. ศึกษาปัจจัยด้านอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซล เช่น ปริมาณของกรดไขมันอิสระของวัตถุดิบ ปริมาณน้ำ ระบบที่ไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ระบบที่ไม่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ เป็นต้น เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ และช่วยลดต้นทุนของการใช้สารเคมีได้
3. การทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล	1. ทำให้ทราบคุณภาพไบโอดีเซลที่ผลิตได้ 2. สะท้อนถึงกระบวนการผลิตว่ามีความสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด 3. สามารถนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ไปใช้ให้ตรงกับประเภทของเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ	1. คุณภาพที่ได้จากการทดสอบยังไม่ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนด เช่น ความหนืด ความเป็นกรด ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล เป็นต้น	1. จะต้องมีการปรับปรุงตั้งแต่วัตถุดิบ กระบวนการผลิต การแยกผลผลิต เพื่อให้ได้คุณภาพไบโอดีเซลตามข้อกำหนดของไบโอดีเซลชุมชน 2. นำไบโอดีเซลที่ทราบคุณภาพแล้ว ไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของไบโอดีเซลประเภทลูกผสม ทำให้ลดปัญหาของความหนืด และความเป็นกรดได้ สามารถใช้กับเครื่องยนต์ที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อเสนอแนะ/ปรับปรุง
4. การศึกษาสมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปเพื่อนำเอนไซม์ไลเปสตรึงรูปกลับมาใช้ซ้ำ	1. ทำให้ทราบถึงจำนวนครั้งของการใช้เอนไซม์ตรึงรูปที่เตรียมได้นำกลับมาใช้ซ้ำในที่นี้สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เพียงครั้งเดียว	1. สรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปที่นำมาใช้ ไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำและต่อเนื่องได้ 2. สมรรถนะของเอนไซม์ตรึงรูปในครั้งที่ 2 ด้อยกว่าครั้งแรกมากกว่าร้อยละ 50 จึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้	1. หากสามารถปรับปรุงวิธีการตรึงตามขั้นตอนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเสถียรภาพและคงตัวลดต่ำลงน้อยหรือมีความใกล้เคียงหลังจากผ่านการใช้งานครั้งแรก สามารถใช้ได้จำนวนหลายครั้งและต่อเนื่อง ยิ่งมาก โอกาสที่จะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นไปได้สูง
5. การคำนวณต้นทุน	1. ทำให้ทราบต้นทุนทั้งหมดของการผลิตไบโอดีเซลว่ารายการใดที่ก่อให้เกิดราคาต้นทุนมาก เพื่อนำไปปรับปรุงและวางแผนการในการผลิต	1. จากการคำนวณต้นทุนการผลิต พบว่า การผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้ มีราคาหน่วยบาทต่อลิตรสูงมาก ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของงานวิจัยนี้ ยังไม่เหมาะสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ณ ปัจจุบัน	1. จะต้องมีการวางแผนปรับปรุงการผลิตในอนาคตโดยหาวัตถุดิบมาแทนน้ำมันปาล์ม เช่น น้ำมันพืชใช้แล้วซึ่งมีต้นทุนถูกกว่า เอนไซม์ไลเปสที่ใช้ต้องสั่งจากต่างประเทศมีราคาแพง ควรจะต้องผลิตเอนไซม์ไลเปสใช้เองในระดับอุตสาหกรรม หาวิธีการตรึงเพื่อให้เอนไซม์ตรึงรูปสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้งและต่อเนื่อง สามารถลดต้นทุนการผลิตได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2549). *ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 ลงวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2549.* กรุงเทพฯ: ม.ป.พ.

----------. (2550). *ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ลงวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2550.* กรุงเทพฯ: ม.ป.พ.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2552). แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี. สืบค้นเมื่อ 21 มิถุนายน 2552, จาก http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/upload/nov50/mar52/REDP_15_yrs_3pages.pdf

กล้าณรงค์ ศรีรอต; และ คนอื่นๆ. (2546). *รายงานการวิจัยการศึกษาสถานภาพวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล.* กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ไกรพัฒน์ จีนขจร. (2550). *พลังงานหมุนเวียน.* กรุงเทพฯ: ส.ส.ท.

คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. (2545). *พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล.* กรุงเทพฯ: แปลน พริ้นท์ติ้ง.

คณะผู้แทนไทยประจำประชาคมยุโรป. (2549). *แนวโน้มสถานการณ์พลังงานของโลก: สถานการณ์พึ่งพาด้านพลังงานของยุโรปและเอเชีย.* สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม 2552, จาก http://news.thaieurope.net/content/view/1023/170

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2548). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.* พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จันทรนาถ พลชำนิ. (2548). *ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยไลเปสจากแบคทีเรีย.* วิทยานิพนธ์ วท.ม. (จุลชีววิทยา). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ถ่ายเอกสาร.

จินตนา สุวรรณรัตน์. (2549). *ปฐพีเคมี.* กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร. (2551). *การตรึงไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน.* วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.

ฉกรรจ์ สังข์ทอง. (255?). *ปาล์มน้ำมัน.* สงขลา: เซาท์เทิร์นเพรสแอนด์พับลิเคชั่น.

เชิดศักดิ์ เมธาธไนศวรรย์. (2535). *การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งทางชีวภาพของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชั่นของน้ำมันรำข้าว.* วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.

ณกัญภัทร จินดา. (2547, กันยายน-ธันวาคม). เอนไซม์ไลเปส I : แหล่งและประโยชน์ระดับหนึ่ง *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.* 24(3): 20-34.

ณกัญภัทร จินดา; และ ทรัพย์ทวี ฝุ่นทอง. (2549, พฤษภาคม-สิงหาคม). เอนไซม์ไลเปส : การผลิตและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.* 26(2): 114-131.

ณรงค์ โฉมเฉลา. (2548, ตุลาคม). พืชพลังงาน. *วารสารพืชปลูกพื้นเมืองไทย.* 1(4) ฉบับพิเศษ: 2-4.

ดุษฎี รัตนพระ. (2549). *การตรึงไลเปสจาก Pseudomonas fluorescens เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน.* วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.

ดุสิต จิตตนูนท์. (2546). *เอกสารการสอนชุดวิชา ดิน น้ำ และปุ๋ย หน่วยที่ 2.* พิมพ์ครั้งที่ 10. นนทบุรี: สาขาวิชาส่งเสริมการเกษตรและสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

ทบวงมหาวิทยาลัย. (2540). *เคมี เล่ม 2.* กรุงเทพฯ: อักษรเจริญทัศน์.

ทรรศพร พิศรูป. (2548). *การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับสารเคลือบผิวอะคริลิก.* วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ถ่ายเอกสาร.

ธีระ เอกสมทราเมษฐ์. (2551, มิถุนายน). สารพัดประโยชน์ของปาล์มน้ำมัน. *วารสาร For Quality.* 15(128): 70-74.

ปรเมษฐ์ น่วมเปี่ยม; และ สินศุภา จุ้ยจุลเจิม. (2549, กันยายน-ธันวาคม). การศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสในสารตั้งต้นน้ำมันปาล์ม. *วารสารวิจัยและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.* 10(1): 13-20.

ประกาศิต คุณพระศิลา. (2550). *การผลิตไบโอดีเซลจากถั่วเหลืองโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.* วิทยานิพนธ์ วท.ม. (การจัดการทรัพยากรการเกษตรและสิ่งแวดล้อม) เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้. ถ่ายเอกสาร.

ประดิษฐ์ มีสุข. (2538). *คู่มือปฏิบัติการเคมีอินทรีย์และชีวเคมีเบื้องต้น.* กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

ปราณี อ่านเปรื่อง. (2543). *เอ็นไซม์ทางอาหาร.* พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ป๋วย อุ่นใจ; และ สยาม ภพลือชัย. (2544, สิงหาคม). ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพแห่งยุคสมัย. *วารสารอัพเดท*. 16(16): 50-56.

ปวีณา อร่ามรัตนา. (2548). *การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันดิบโดยใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.

พิศมัย เจนวินิชปัญจกุล; และ ลลิตา อัตนโถ. (2549). *รอบรู้...เรื่องราว ไบโอดีเซล*. ปทุมธานี: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.).

พืชพรรณ/กองบรรณาธิการ. (2551). มารู้จักปาล์มน้ำมันกันก่อน. *วารสารเกษตรธรรมชาติ*. (4): 45-50.

ภาณี วัฒนโอฬาร. (2535). *เอกสารประกอบการสอนวิชา เคมีเชิงฟิสิกส์ 1*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

มัทนา ธิติศักดิ์; และ จิตติโสภา สุจิตต์. (2546). *การเตรียมฟิล์มนาโนคอมโพสิระหว่างแป้ง/เจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์*. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รติกร อลงกรณ์โชติกุล. (2550, มีนาคม-เมษายน). สมบัติของไบโอดีเซล...ที่เราต้องการ. *วารสารวิทยาศาสตร์*. 61(2): 143-147.

รัตนา สัมพันธชิต. (2548). *ชีวเคมี : โครงสร้างและหน้าที่ของชีวโมเลกุล*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

รัตนา สายคณิต; และ ชลลดา จามรกุล. (2547). *เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: โครงการตำรา ลำดับที่ 46 ศูนย์บริการเอกสารวาการ คณะเศรษฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รายงาน/กองบรรณาธิการ. (2551). สถานการณ์ตลาดปาล์มน้ำมันในประเทศไทย. *วารสารเกษตรธรรมชาติ*. (4): 38-44.

เราเหลือพลังงานในโลก อีกแค่ไหน ?. (2551, 10-13 กรกฎาคม). *ประชาชาติธุรกิจ*. หน้า 43-44.

วิกิพีเดีย, สารานุกรมเสรี. (2555). *เอนไซม์*. สืบค้นเมื่อ 6 มีนาคม 2555, จาก http:// th.wikipedia.org/wiki/เอนไซม์

วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน; และ สุจิตรา พรหมเชื้อ. (2548, ตุลาคม). การผลิตไบโอดีเซล. *วารสารพืชปลูกพื้นเมืองไทย*. 1(4) ฉบับพิเศษ: 27-34.

วิภาวดี ปริพัฒนไพโรจน์. (2546). การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากไขปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เทคโนโลยีชีวภาพ). สงขลา: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ถ่ายเอกสาร.

วรรณรัตน์ ชาญนุกูล. (2554, พฤษภาคม). ทิศทางพลังงานไทย. *วารสารรักษ์พลังงาน.* 9(66): 10-23.

ศักดิ์ศิลป์ โชติสกุล; วินาภรณ์ กุฎีรัตน์; และ กิจจารักษ์ วงษ์กุดเลาะ. (2541). *เอกสารวิชาการ เรื่อง ปาล์มน้ำมัน.* กรุงเทพฯ: กองส่งเสริมพืชไร่นา กรมส่งเสริมการเกษตร.

ศิริรัตน์ โรจนพิพัฒน์กุล; และ วศินี พุมมา. (2548). *การทำทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งมอนท์มอริลโลไนต์.* โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริรัตน์ สาระเวก. (2528). *เอ็นไซม์.* ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์. (2535). *เอกสารประกอบการสอนวิชา เคมีฟิสิกัล 1.* มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาสารคาม.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2547). *สถานภาพปัจจุบันและข้อเสนอสู่อนาคตด้านเชื้อเพลิงและเทคโนโลยีเชื้อเพลิงของประเทศไทย.* ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

ส.สายลม. (2544, พฤษภาคม-มิถุนายน). ไบโอดีเซลพลังงานทดแทน. *วารสารสามิตสาร.* 57(3): 83-90.

สง่า ตั้งชวาล. (2523). *แร่วิทยาสำหรับวิศวกร.* กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

----------. (2549). *ธรณีวิศวกรรมขั้นพื้นฐาน.* พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2542). *ปฐพีกลศาสตร์.* กรุงเทพฯ: ไลบรารี่นาย พับลิชชิ่ง.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2550). *การพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนสำหรับประเทศไทย.* ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2553). “รายงานประจำปี 2552 EPPO” กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2554). *สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2552.* สืบค้นเมื่อ 17 กันยายน 2554, จาก http://www.oae.go.th/download/download_journal/yearbook2552.pdf

สิริพันธุ์ จุลกรังคะ. (2541). *โภชนศาสตร์เบื้องต้น.* กรุงเทพฯ: ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิริรุ่ง วงศ์สกุล. (2546, สิงหาคม*).* การสังเคราะห์ Structured triglycerides แบบ 2 ขั้นตอน ด้วยเอนไซม์ไลเปส. *วารสาร LAB.TODAY.* 2(13): 21-24.

สุนันทา ภิญญาวัธน์. (2542). *เอกสารการประชุมเชิงปฏิบัติการ เรื่องเอนไซม์เทคโนโลยี.* กรุงเทพฯ: สาขาชีวเคมี สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

สุพรชัย มั่งมีสิทธิ์. (2550). *ไบโอดีเซลชุมชนคนรากแก้ว วิถีการอยู่อย่างพอเพียง.* นครปฐม: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สุภาพ สุทธิรักษ์. (2550). *การดำเนินธุรกิจการผลิตไบโอดีเซลของชุมชน : กรณีน้ำมันใช้แล้ว.* เอกสารวิชาการเลขที่ 302 สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ: ม.ป.พ.

สุมณฑา วัฒนสินธุ์; และ ทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ. (2543). *เอกสารการสอนชุดวิชา ชีวเคมีพื้นฐาน หน่วยที่ 5.* นนทบุรี: สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

อัญชลี สุทธิประการ. (2534). *แร่ในดิน : แร่ดินเหนียวและเทคนิคการวิเคราะห์ เล่ม 2.* กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ์; และ อาจารี อัศวดิลกฤทธิ์. (2550). *การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง/มอนต์มอริลโลไนต์.* โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุมาพร อุประ; และ อรวินท์ เลาหรัชตนันท์. (2543). *เอกสารการสอนชุดวิชา ชีวเคมีพื้นฐาน หน่วยที่ 3.* นนทบุรี: สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

BIODIESEL หลากหลายปัจจัย ไบโอดีเซล พลังงานทางเลือก. (2549, พฤศจิกายน). *วารสารส่งออก.* 20(462): 75-82.

David MogK. (2009). *Teaching Clay Mineralogy*. Retrieved March 12, 2009, from http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/clay_mineralogy.html

Gopinath Sanjay; & Sankaran Sugunan. (2008). Acid activated montmorillonite: an efficient immobilization support for improving reusability, storage stability and operational stability of enzymes. *Porous Mater.* (15): 359-367.

Hideki Fukuda ; Akihiko Kondo & Hideo Noda. (2001, September). Biodiesel Fuel Product by Transesterification of Oils. *Bioscience and Bioengineering.* 5(92): 405-416.

Isidoro Emilio de Fuentes; et al. (2001). Different phyllosilicates as supports for lipase immobilization. *Molecular Catalysis B: Enzymatic*. (11): 657-663.

M. Ghiaci; et al. (2009). Enzyme immobilization Part 1. Modified bentonite as a new and efficient support for immobilization of *Candida rugosa* lipase. *Applied Clay Science*. (43): 289-295.

Mohamed M. Soumanou; & Uwe T. Bornscheuer. (2003). Improvement in lipase-catalyzed synthesis of fatty acid methyl esters from sunflower oil. *Enzyme and Microbial Technology*. (33): 97-103.

Montmorillonite Mineral Data. (2009). Retrieved March 12, 2009, from http://webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml

N.R. Kamini; & H. Iefuji. (2001). Lipase catalyzed methanolysis of vegetable oils in aqueous medium by *Cryptococcus spp. S-2*. *Process Biochemistry*. (37): 405-410.

Ping Shao; et al. (2008). Analysis of immobilized *Candida rugosa* lipase catalyzed Preparation of biodiesel from rapeseed soapstock. *Food and Bioproducts Processing*. (86): 283-289.

P. Vanessa Lara; & Enoch Y. Park. (2004). Potential application of waste activated bleaching earth on the production of fatty acid alkyl esters using *Candida cylindracea* lipase in organic solvent system. *Enzyme and Microbial Technology*. (34): 270-277.

Shweta Shah; & Munishwar N. Gupta. (2007). Lipase catalyzed preparation of biodiesel from Jatropha oil in a solvent free system. *Process Biochemistry*. (42): 409–414.

Srivathsan Vembanur Ranganathan ; Srinivasan Lakshmi Narasimhan & Karuppan Muthukumar. (2008). An overview of enzymatic product of biodiesel. *Bioresource Technology*. (99): 3977.

Wikipedia, the free encyclopedia. (2009). *Montmorillonite*. Retrieved March 12, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การคำนวณและการเตรียมสารเคมี

1. **การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันปาล์มก่อนการทดลอง**

การกำจัดยางเหนียว

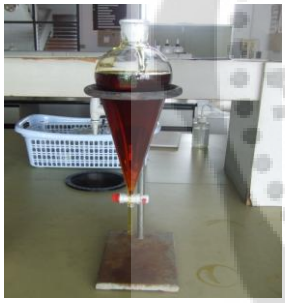
มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ให้ความร้อนกับน้ำมันปาล์มดิบ ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส
2. ใส่กรดฟอสฟอริก 85% อัตราส่วน 1 : 9 ปริมาณ 1% ของน้ำมันปาล์มดิบ
3. กวนเป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง
4. เทใส่ลงกรวยแยก เพื่อแยกยางเหนียวออกจากน้ำมันปาล์มดิบ

1. น้ำมันปาล์มดิบจากโรงงาน

2. ต้มให้ความร้อน

3. นำน้ำมันปาล์มดิบเทใส่กรวยแยก



4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

5. จะเห็นยางเหนียวสีดำข้างล่าง

6. จะได้น้ำมันปาล์มหลังจากแยกยางเหนียวออก

ภาพประกอบ 44 การกำจัดยางเหนียวออกจากน้ำมันปาล์มดิบ

การเตรียมน้ำมันปาล์มโอลิอิน โดยวิธีการตกผลึก (Crystallization) (ปรเมษฐ์ น่วม เปี่ยม. 2552: 53)

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการกำจัดยางเหนียวแล้ว มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เวลา 15 – 20 นาที
2. ตั้งทิ้งไว้ในตู้เย็น จนน้ำมันปาล์มแยกออกเป็น 2 ชั้น
3. ทำการกรองแยกนำของเหลวใสสีเหลืองส่วนบน (น้ำมันปาล์มโอลิอิน) ไปใช้เป็นวัตถุดิบน้ำมันปาล์มสำหรับการทดลอง ส่วนชั้นล่างเป็นของแข็งสีขาว (ปาล์มสเตียริน)

2. การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7

การเตรียม stock solution

สารละลาย ก : เตรียม 0.2 M สารละลายโมโนเบสิก โซเดียมฟอสเฟต ($NaH_2PO_4.2H_2O$) โดยชั่ง $NaH_2PO_4.2H_2O$ 13.9 กรัม ละลายน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร

สารละลาย ข : เตรียม 0.2 M สารละลายไดเบสิก โซเดียมฟอสเฟต ($Na_2HPO_4.2H_2O$) โดยชั่ง $Na_2HPO_4.2H_2O$ 17.8 กรัม ละลายน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร

ผสมสารละลาย ก 39 มิลลิลิตร และ สารละลาย ข 61 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 7 เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

ภาพประกอบ 45 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 โดยวัดด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

3. **การคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม** (จันทรนาถ พลชำนิ. 2548: 99)

มวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ คำนวณโดย

จากสูตร $MW_{TG} = 3R_{aver} + 173$

$$R_{aver} = \sum\left(\frac{\%FA_n}{100} \times MW_n\right)$$

โดยที่ MW_{TG} = มวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์หรือมวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม

R_{aver} = มวลโมเลกุลของกรดไขมันทั้งสามตำแหน่งที่มา esterified กับกลีเซอรอล ซึ่งหักมวลโมเลกุลของ – COOH ออกแล้ว

$\%FA_n$ = ร้อยละของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน

Mw_n = มวลโมเลกุลของกรดไขมันที่ลบออกด้วยมวลโมเลกุลของ – COOH ออกแล้ว (ลบออกด้วย 45)

นำน้ำมันปาล์มโอลิอินที่เตรียมสำหรับเป็นวัตถุดิบไว้ใช้ในการทดลอง ส่งไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบของกรดไขมัน ที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

ส่วนประกอบของกรดไขมัน	ผลการวิเคราะห์ (ร้อยละ)
C12:0 Lauric acid	3.85
C14:0 Myristic acid	2.16
C16:0 Palmitic acid	37.98
C18:0 Stearic acid	4.62
C18:1 Oleic acid	39.84
C18:2 Linoleic acid	11.55

คำนวณหามวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม แทนค่าในสูตร

R_{aver} = (0.0385 x 155) + (0.0216 x 183) + (0.3798 x 211) + (0.0462 x 239) + (0.3984 x 237) + (0.1155 x 235)

= 222.66

MW_{TG} = (3 x 222.66) + 173

= 840.98 ≈ 841

4. การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล

เมื่อทราบมวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนกาเตรียมเป็นวัตถุดิบสำหรับใช้ในการทดลองแล้ว สามารถคำนวณน้ำหนักและปริมาตรของเมทานอลที่จะต้องเติมลงไปในแต่ละการทดลองได้ กำหนดไว้ว่าจะใช้น้ำมันปาล์ม 5 กรัมในการทดลองทุกขวดฝาเกลียว

อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เป็น 1:4

น้ำมันปาล์ม 5 กรัม คิดเป็น 5 ÷ มวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม (841) = 5.94×10^{-3} โมล

ดังนั้น ต้องใช้เมทานอล $4 \times 5.94 \times 10^{-3}$ โมล คิดเป็น $4 \times 5.94 \times 10^{-3} \times 32 = 0.760$ กรัม

คิดเป็น 0.760 ÷ 0.793 = 0.958 มิลลิลิตร

4. การคำนวณปริมาณเฮกเซนที่ใช้

ปริมาณเฮกเซน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของเฮกเซน ดังนั้น น้ำมันปาล์ม 5 กรัม จะต้องใช้เฮกเซน 5 มิลลิลิตร

5. การคำนวณปริมาณสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ที่ใช้

ปริมาณสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในหน่วยกรัมของน้ำมันปาล์มต่อหน่วยมิลลิลิตรของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ดังนั้น น้ำมันปาล์ม 5 กรัม จะต้องใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร

6. การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักเทียบน้ำมันปาล์ม ดังนั้น น้ำมันปาล์ม 5 กรัม คิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5×10^{-3} กรัม

7. การคำนวณร้อยละของผลผลิตที่ได้ (Yield) (จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร. 2551: 67)

การคำนวณร้อยละของผลผลิตที่ได้ ในที่นี้คือ ไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ชั้นบนหลังจากแยกกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออกจากไบโอดีเซลแล้ว ตามวิธีของ Leung and Guo (2006) โดยสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$\text{Yield} = \frac{\text{Weight of Product (g)}}{\text{Weight of Raw Oil (g)}} \times 100$$

โดยที่ Weight of Product = น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ หน่วยเป็น กรัม

Weight of Raw Oil = น้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น หน่วยเป็น กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของน้ำมันปาล์มวัตถุดิบเริ่มต้นเท่ากับ 50 กรัม

น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เท่ากับ 42.21 กรัม

ดังนั้น ร้อยละของไบโอดีเซล เท่ากับ $\frac{42.21}{50} \times 100 = 84.42$

ภาคผนวก ข
การหาปริมาณโปรตีน และหาปริมาณโปรตีนที่ยึดเกาะ

1. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ไลเปส ตามวิธีของ Bradford (1976) (ดุษฎี รัตนพระ. 2549: 90)

สารเคมี

1. การเตรียมสารละลายสี

เตรียมโดยละลายสารสี coomassie brilliant blue G-250 50 มิลลิกรัมในเอทานอล (99.5 เปอร์เซ็นต์) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เติมกรดฟอสฟอริก (85 เปอร์เซ็นต์) ลงไป 50 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1

2. เตรียมสารละลายโปรตีนมาตรฐาน เตรียมสารละลายโปรตีนของ BSA (bovine serum albumin) ความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

โดยชั่ง BSA 50 มิลลิกรัม ค่อยๆ เติมน้ำกลั่น เพื่อชะฟองที่เกิดขึ้น เมื่อชะฟองหมดปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0-20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

3. การเตรียมสารละลายโปรตีน BSA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

หลอดที่	สารละลายโปรตีน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (ไมโครลิตร)	สารละลายโปรตีน (500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) (ไมโครลิตร)
1	0	2000	0
2	5	1980	20
3	10	1960	40
4	15	1940	60
5	20	1920	80
6	25	1900	100

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปตตัวอย่างที่เจือจางเหมาะสมและสารละลายโปรตีนมาตรฐานลงในหลอดทดลอง ตามตารางข้างต้น

2. เติมสารละลายสีลงในหลอดทดลอง 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 5 นาที

3. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างและสารละลายโปรตีนมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

4. นำค่าการดูดกลืนแสงมาเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายโปรตีน เพื่อหาความเข้มข้นโปรตีนของตัวอย่าง หรือคำนวณจาก

การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของโปรตีน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)} = \frac{\text{(ค่าการดูดกลืนแสงที่ 595 นาโนเมตร) x (อัตราการเจือจาง)}}{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน}}$$

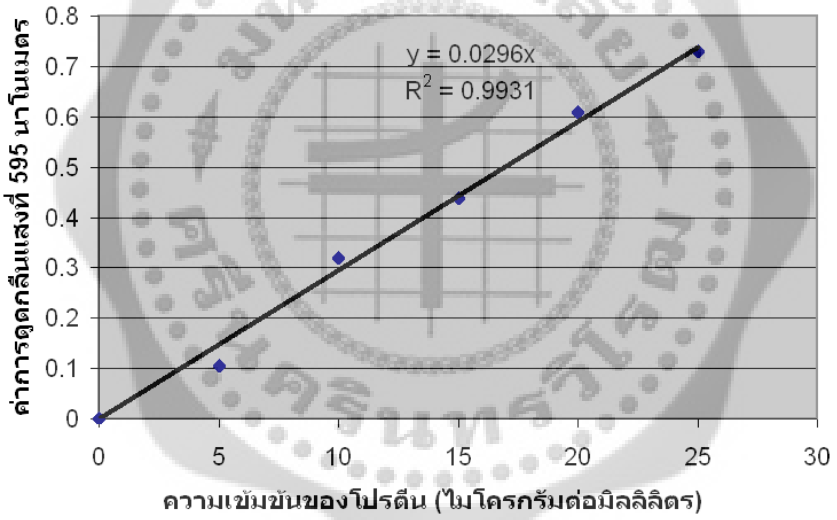
2. **หาปริมาณโปรตีนที่ยึดเกาะ (ดุษฎี รัตนพระ. 2549: 97)**

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณโปรตีนที่ยึดเกาะ (ร้อยละ)} = \frac{[(P_O - P_f)] \times 100}{P_O}$$

โดย P_O = ปริมาณโปรตีนของสารละลายเอนไซม์ก่อนตรึง (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

P_f = ปริมาณโปรตีนของสารละลายเอนไซม์หลังตรึง (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)



ภาพประกอบ 46 กราฟมาตรฐานของสารละลายโปรตีน BSA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ภาคผนวก ค

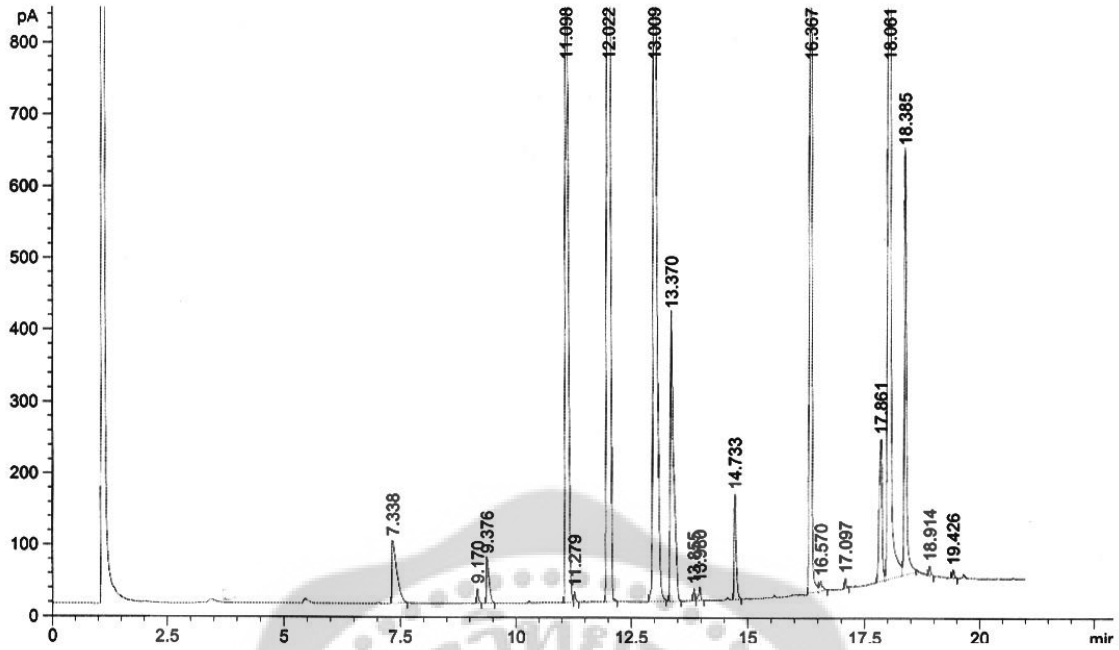
การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล โดยหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester yield or FAME) ในไบโอดีเซลที่ได้

1. **หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์** (methyl ester yield) **ในไบโอดีเซลที่ได้ โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ** (Gas Chromatograph, GC) (Agilent Technique, 6890N, USA.) **ตามมาตรฐาน** (BS EN 14103:2003)

ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น เป็นการบอกถึงปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันว่าเกิดขึ้นมากหรือน้อย ถ้าเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมาก จะส่งผลให้ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์มาก การหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจริงสามารถคำนวณได้จากโครมาโทรแกรมของแก๊สโครมาโทกราฟี โดยการนำมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน เมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดจะมี retention time ไม่เท่ากัน เมทิลเอสเทอร์ชนิดเดียวกันจะมี retention ที่เท่ากันเสมอ จึงใช้หลักการนี้ในการพิจารณาว่าเป็นเมทิลเอสเทอร์ชนิดใด

ตาราง 23 แสดงค่าของ retention time ของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด

RT, (min)	Name
7.338	Methyl octanoate
9.170	Methyl laurate
9.376	Methyl myristate
13.009	Methyl heptadecanoate
11.098	Methyl palmitate
12.022	Methyl palmitoleate
13.370	Methyl oleate
13.855	Methyl linoleate
13.980	Methyl linolenate
14.733	Methyl stearate
16.367	Methyl arachidate
18.061	Methyl erucate
18.385	Methyl benhenate



ภาพประกอบ 47 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลตัวอย่าง

ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล มีสูตรคำนวณคือ

$$C\ (\%) = \frac{\Sigma A - A_{IS}}{A_{IS}} \times \frac{C_{IS} \times V_{IS}}{W} \times 100$$

เมื่อ

C = ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ (% wt)

ΣA = พื้นที่ใต้โครมาโทรแกรมทั้งหมดของเมทิลเอสเทอร์ ตั้งแต่ C_8 ถึง $C_{24:1}$

A_{IS} = พื้นที่ใต้โครมาโทรแกรมของ methyl heptadecanoate : C_{17}

C_{IS} = ความเข้มข้นของ Internal Standard (methyl heptadecanoate : C_{17}) (mg/ml)

V_{IS} = ปริมาตรของ Internal Standard ที่ใช้ (ml)

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ (mg)

แทนค่า

ΣA = 37690.6

A_{IS} = 7478.22754

C_{IS} = 10 mg/ml

V_{IS} = 1 ml

W = 42.7 mg

$$C\ (\%\ wt) = \frac{37690.6 - 7478.22754}{7478.22754} \times \frac{10\ mg/ml \times 1\ ml}{42.7\ mg} \times 100$$

= 94.61

ดังนั้น ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลคือ 94.61

ภาคผนวก ง
ภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. **การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา** การตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

1. นำมอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 มาล้างด้วยน้ำดีไอออนไนซ์ และ เขย่าด้วยเครื่องกวน

2. กรองมอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3. จะได้มอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 หลังจากการกรอง

4. นำมอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 เข้าตู้อบ

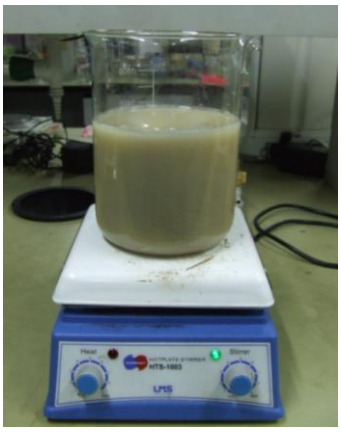
5. จะได้มอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 เป็นก้อนแล้วนำมาบดละเอียด

6. นำมอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 ที่บดแล้วใส่ถ้วยกระเบื้อง และนำไปเผาต่อในเตาเผา

7. จะได้มอนต์มอริลโลไนต์ เค 10 ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวนวล สำหรับใช้เป็นตัวพยุง

ภาพประกอบ 48 การเตรียมตัวพยุง

1. นำเอนไซม์ไลเปสอิสระ ตัวพยุง และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์มาผสมเข้ากัน



2. เมื่อผสมเสร็จแล้ว นำไปเขย่าบนเครื่องกวน

3. กรองเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพ

4. จะได้เอนไซม์ไลเปสตรึงรูป มีลักษณะเป็นผงหยาบ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาพประกอบ 49 วิธีการตรึงเอนไซม์ไลเปสบนมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ

2. การผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสม

1. น้ำมันปาล์ม เฮกเซน เอนไซม์ตรึงรูป สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ผสมเข้ากัน

2. นำสารตั้งต้นจากข้อ 1 มาห่อฟอยล์

3. นำเข้าเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ

4. นำสารที่ผ่านการเขย่า มาเติมเมทานอล

5. หลังจากเติมเมทานอลแล้ว นำมาห่อฟอยล์ แล้วเข้าเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิอีกครั้ง

6. นำผลผลิตที่คาดว่าเป็นไบโอดีเซล มาเทใส่ในกรวยแยก เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออก

7. ตั้งผลผลิตที่คาดว่าเป็นไบโอดีเซลทิ้งไว้ เพื่อรอให้กลีเซอรอลตกตะกอน

8. เมื่อกลีเซอรอลตกตะกอนลงมาข้างล่าง จะมีลักษณะคล้ายวุ้น

9. จะได้ผลผลิตที่คาดว่าเป็นไบโอดีเซล หลังจากแยกกลีเซอรอลชั้นล่างออก

10. นำผลผลิตจากข้อ 9 มาใส่ขวดก้นกลม แล้วเข้าเครื่องกลั่นระเหย

11. หลังจากการกลั่นแล้ว นำมาใส่หลอดทดลอง

12. นำเข้าเครื่องเซนตริฟิวจ์ เพื่อแยกส่วนที่เป็นตะกอนตกค้างออกจากผลผลิต

13. จะได้ผลผลิตที่คาดว่าเป็นไบโอดีเซล เพื่อนำไปทดสอบคุณภาพ

ภาพประกอบ 50 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสม

ภาคผนวก จ
หนังสือขอความอนุเคราะห์

บันทึกข้อความ

ที่ ศธ 0519.7.04/ วันที่ 29 ธันวาคม 2552

เรื่อง ขอใช้สถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

เรียน หัวหน้าภาควิชาเคมี

ตามที่ ข้าพเจ้านายเอกพล อุดมกิจพิพัฒน์ ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ สังกัดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ได้ขอลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ ภาคพิเศษ แผน ก ณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ภาคนอกเวลาราชการ) บัดนี้ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยในการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์แล้วนั้น ข้าพเจ้าจึงมีความประสงค์ขออนุมัติใช้สถานที่ห้อง 15-223 และอุปกรณ์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อทำปริญญานิพนธ์เรื่องดังกล่าว ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2553 เป็นต้นไป ในเวลานอกเวลาราชการ จนได้ปริญญานิพนธ์ที่เสร็จสมบูรณ์

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณาอนุมัติ จักเป็นพระคุณยิ่ง

(นายเอกพล อุดมกิจพิพัฒน์)
นักวิทยาศาสตร์

อนุมัติ

ดร.ประเสริฐ พัฒนาประทีป
(หัวหน้าภาควิชาเคมี)

บันทึกข้อความ

ที่ ศธ 0519.7.04/109 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2553

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ใช้เครื่องเขย่า

เรียน หัวหน้าภาควิชาชีววิทยา

ด้วยข้าพเจ้า นายเอกพล อุดมกิจพิพัฒน์ ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ สังกัดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีความประสงค์ขอความอนุเคราะห์ ขอใช้เครื่องเขย่า (incubation shaker) เพื่อใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์ ทั้งนี้ข้าพเจ้าได้ติดต่อในเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือดังกล่าวไปยัง ผศ. ขจีนาฏ โพธิเวชกุล แล้ว และข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุมัติ จักเป็นพระคุณยิ่ง

(นายเอกพล อุดมกิจพิพัฒน์)
นักวิทยาศาสตร์

(ดร. ประเสริฐ พัฒนาประทีป)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

เรียน ผศ. ขจีนาฏ
โปรดให้ความอนุเคราะห์
(ดร.สมเกียรติ พรพิสุทธินาท)
หัวหน้าภาควิชาชีววิทยา
3 ก.พ. 2553

เรียน หัวหน้าภาควิชาเคมี
ภาควิชาไม่ขัดข้อง กรุณาติดต่อ ผศ. ขจีนาฏ โดยตรง
(ดร.สมเกียรติ พรพิสุทธินาท)
หัวหน้าภาควิชาชีววิทยา
3 กพ 2553

ที่ ศธ 0519.12/ 0313

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

3 กุมภาพันธ์ 2555

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน อาจารย์รยากร นกแก้ว

เนื่องด้วย นายพุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์ นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง "การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์ไลเปสตรึงบนมอนต์มอริลโลไนต์" โดยมี อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และรองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญท่านเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันปาล์ม และไบโอดีเซล

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้นายพุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
โทร. 0-2649-5064
หมายเหตุ : สอบถามข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อนิสิต โทรศัพท์ 080-259-3789

ภาคผนวก ฉ
ประวัติย่อผู้เชี่ยวชาญ

ประวัติย่อผู้เชี่ยวชาญ

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวรยากร นกแก้ว
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โทรศัพท์	02-9427615, 02-562-5555 ต่อ 2120
อีเมล์	mhaew5060@yahoo.com , psdryk@ku.ac.th

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548 - 2551	ปริญญาโท วท.ม. (เคมี) สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2542 - 2544	ปริญญาตรี วท.บ. (เคมี) สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2539 - 2541	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (เคมี) สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม-ปิโตรเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2552 - ปัจจุบัน	นักวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้ช่วยสอนการผลิตและวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยากรเรื่องการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับชุมชน
พ.ศ. 2547 - 2548	วิศวกรเคมี บริษัท KCE Electronic จำกัด จังหวัดกรุงเทพฯ
พ.ศ. 2545 - 2546	นักเคมี บริษัท Great Test Gold & Refinery จำกัด จังหวัดกรุงเทพฯ

ความเชี่ยวชาญพิเศษ

น้ำมันไบโอดีเซล จากพืชชนิดต่างๆ น้ำมันใช้แล้ว ไขมันสัตว์ ของเสียจากบ่อดักไขมัน
การกำจัดสารพิษฟอร์บอล เอสเทอร์ในน้ำมันและเนื้อของเมล็ดสบู่ดำ
การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ GC, HPLC, FT-IR, UV-Vis spectrophotometer, เครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion)
เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน

ผลงานวิจัย

1. **Nokkaew**, R, and Punsuvon, V., 2006. Elimination of Phorbol Esters from Jatropha Curcas seed Oil by Adsorption. Proceedings in 32nd Congress on Science and Technology of Thailand, Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand, 177.
2. **Nokkaew, R.**, Punsuvon V., and Vithanomsat P. 2007. Study toxicity and detoxification of seed oil of Jatropha curcas by Adsorption. The Proceeding of 45th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, Thailand, 68-75.
3. Punsuvon, V., **Nokkaew, R.** and Vaithanomsat, P. 2007. Study phorbol esters in different parts of Jatropha curcas and determination of phorbol esters adsorpbent in Jatropha curcas oil . Proceedign of 1st Jatropha curcas Conference, Bangkok, Thailand, 252-257.
4. **Nokkaew, R.**, Punsuvon, V. and Vaithanomsat, P. 2008. Elimiated Phorbol esters in seed oil and press cake of Jatropha curcus L. Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference, Bangkok, Thailand, 202-207.
5. **Nokkaew, R.** and Punsuvon, V. ,2009. Analysis of Phorbol Esters Residue in Soil and Vegetable with Using *Jatropha Curcas* Seed Cake as Fertilizer, Proceding of The 35th Congress on Science and Technology of Thailand (STT35),
6. **Nokkaew, R**, Punsuvon, V. , Vaithanomsat, P. and Khunrong ,T., 2010.Acid Impregnation and Steam Explosion of Oil Palm Frond for Ethanol Production, Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference PACCON2010.

7. Punsuvon, V., **Nokkaew, R.**, 2010. Phorbol Esters Residues Analysis in Case of Applying *Jatropha Curcas* Seedcake as Fertilizer for Sweet Potato, Proceding of The Sixth Thailand Materials Science and Technology Conference, Thailand.
8. Wanreak, W., Tungkananuruk, N., Punsuvon, V., and **Nokkaew, R.**, 2010. Production of Community from Waste Cooking Oil in Meeting the Commercial Biodiesel Standard, Proceeding of THE 34TH CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY THAILAND (STT 36), October 26th – 28th , 2010, Bangkok Internatlonal Trade and Exhibition Centre (BITEC), Bangkok, Thailand.
9. **Nokkaew, R.** and Punsuvon, 2010. Quality Control of Community Biodiesel in Northeast of Thailand. Proceeding of THE 34TH CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY THAILAND (STT 36), October 26th – 28th , 2010, Bangkok Internatlonal Trade and Exhibition Centre (BITEC), Bangkok, Thailand
10. Yoojongdee, P., Tungkananuruk, N., Punsuvon, V. And **Nokkaew, R.**, 2010. Production of Biodiesel from Crude Palm Oil Extracted from Bentonite, Proceeding of THE 34TH CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY THAILAND (STT 36), Bangkok, Thailand.
11. Punsuvon, V., **Nokkaew, R.**, and Somkliang, P., 2011, Fatty Acid Composition and Properties of Pongamia Pinnata Oil and Its Methyl esters from Southern Region of Thailand, PACCON2011, January 5st-7th, Srinakharinwirot University and Chemical Society of Thailand. Miracle Grand Hotel, Bangkok, Thailand.
12. Punsuvon, V., **Nokkaew, R.**, Somkliang, P., Taponwong, M., and Karnasuta, S., 2011. Process Optimization for Biodiesel Production from Animal Fat via Two-step Catalyzed Process, J. of Environmental Science and Engineering, 5, 453-459.
13. Punsuvon, V., **Nokkaew, R.**, Somkliang, P., Taponwong, M., and Karnasuta, S., 2011. Process Optimization for Biodiesel Production from Animal Fat via Two-step Catalyzed Process, The 1st EnvironmentAsia International Conference on "Environmental Supporting in Food and Energy Security: Crisis and Opportunity, 22-25 March, 2011, Rama Garden Hotel, Bangkok, Thailand.

14. Wanreak, W., Tungkananuruk, N., Punsuvon, V., and **Nokkaew,R.**, 2011. Comparison of Biodiesel Process from Waste Cooking Oil in Quality to Meet Commercial Biodiesel Standard, The Processing of 49th Kasetsart University Annual Conference, Vol.5, 442-449.
15. **Nokkaew, R.**, Punsuvon, V., Karnasuta, S., and Tapanwong, M., 2011. Optimization of Biodiesel Production from Trap Grease of Hospital Cafeteria Using Response Surface Methodology, 4th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2011):A Paradigm Shift to Low Carbon Society 23-25 November 2011, Bangkok, Thailand.
16. **Nokkaew, R.**, and Punsuvon, V., Production of Free Fatty Acid from Hydrolysis of Waste Coconut Milk from Waste Water Pond Using Hydrochloric Acid, 14th Asian Chemical Congress (14ACC), 5-8 September, 2011, Bangkok, Thailand.
17. Timyamprasert, A., Vittaya Punsuvon[2,3] , Kasem Chunkao[1] , **Rayakorn Nokkaew**[3] , Preparation of Biodiesel from Palm Oil in Wastewater Pond, 14th Asian Chemical Congress (14ACC), 5-8 September, 2011, Bangkok, Thailand.
18. Punsuvon, V., **Nokkaew, R.**, Somkliang, P., Taponwong, M., and Karnasuta, S., 2011. Process Optimization of Esterification for Biodiesel Production from Animal Fat, Taylor&Francis (Accept paper in this journal's current from which will now be forwared to the publisher for copy editing and typetting).
19. Punsuvon, V. and **Nokkaew, R.**, 2012. COMPARISON OF DETOXIFICATION METHODS ON PHORBOL ESTERS IN DEOILED *JATROPHA CURCAS* MEAL FOR ANIMAL FEEDS, Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference, Bangkok, Thailand.

ภาคผนวก ซ

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล

ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Center of Excellence-Oil Palm Kasetsart University
50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
โทรศัพท์ 0-2942-7615, 0-2562-5555 ต่อ 2120 โทรสาร 0-2562-5555 ต่อ 2120

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ตัวอย่างจาก : นายพุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์
ลักษณะตัวอย่าง : น้ำมันไบโอดีเซล
วันที่รับตัวอย่าง : 3 มกราคม 2555

ผลวิเคราะห์
มาตรฐานไบโอดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน)

ที่	ข้อกำหนด		วิธีทดสอบ	ค่ามาตรฐาน		ผลการวิเคราะห์
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	Kg/m^3	ASTM D 1298	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	860 900	900
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D 445	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	1.9 8.0	28.56
3	จุดวาบไฟ	°C	ASTM D 93	ไม่ต่ำกว่า	120	170
4	ค่าของกรด	mg KOH/g	ASTM D 664	ไม่สูงกว่า	0.8	40
5	เมทิลเอสเทอร์	%wt.	EN 14103	ไม่ต่ำกว่า	96.5	94.61

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์

.....
(นางสาวรยากร นกแก้ว)
ตำแหน่ง นักวิจัย

ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ/วิเคราะห์เท่านั้น และรายงานผลต้องไม่ถูกสำเนาเฉพาะบางส่วนยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับการยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

ภาคผนวก ซ

หนังสือสำคัญแสดงการเปลี่ยนชื่อตัว-ชื่อสกุล

เลขที่ ๘๕/๒๕๕๔ แบบ ช.๕

หนังสือสำคัญแสดงการจดทะเบียนเปลี่ยนชื่อสกุล

นายเอกพล อุดมกิจพิพัฒน์

เลขประจำตัวประชาชน ๓-๘๖๙๘-๐๐๐๐๑-๑๑-๒

อยู่บ้านเลขที่ ๓๔/๘๙ หมู่ ๒ แขวงตลาดบางเขน

เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

บิดาชื่อ นพอนันต์ มารดาชื่อ ประภาวัลย์

ได้ขอเปลี่ยนชื่อสกุลเป็น **" แซ่เอี้ยว "**

กรณี กลับมาใช้ชื่อสกุลเดิมของตน

นายทะเบียนได้อนุญาตตามคำขอที่ ๒๗๔/๒๕๕๔ ลงวันที่ ๔ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๔

จึงออกหนังสือสำคัญนี้ให้ไว้เป็นหลักฐาน

สำนักงานเขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

ออก ณ วันที่ ๔ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๕๔

(นางปรานี เกื้อสกุล)

นายทะเบียนท้องที่

ประทับตราประจำตำแหน่งเป็นสำคัญ

เลขที่ ๑๑๗/๒๕๕๔ แบบ ช.๓

หนังสือสำคัญแสดงการเปลี่ยนชื่อตัว

นายเอกพล แซ่เอี้ยว

เลขประจำตัวประชาชน ๓-๘๖๙๘-๐๐๐๐๑-๑๑-๒

อยู่บ้านเลขที่ ๓๔/๘๙ หมู่ที่ ๒ แขวงตลาดบางเขน

เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

บิดาชื่อ นพอนันต์ มารดาชื่อ ประภาวัลย์

ได้ขอเปลี่ยนชื่อตัว เป็น **" พุฒิพัฒน์ "**

นายทะเบียนได้อนุญาตตามคำขอที่ ๒๘๒/๒๕๕๔ ลงวันที่ ๔ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๔

จึงออกหนังสือสำคัญนี้ให้ไว้เป็นหลักฐาน

สำนักงาน เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

ออก ณ วันที่ ๔ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๕๔

(นางปราณี เกื้อสกุล)

นายทะเบียนท้องที่

ประทับตราประจำตำแหน่งเป็นสำคัญ

เลขที่ ๘๗/๒๕๕๔ แบบ ช.๕

หนังสือสำคัญแสดงการจดทะเบียนเปลี่ยนชื่อสกุล

นายเอกพล แซ่เอี้ยว

เลขประจำตัวประชาชน ๓-๘๖๙๘-๐๐๐๐๑-๑๑-๒

อยู่บ้านเลขที่ ๓๔/๘๔ หมู่ ๒ แขวงตลาดบางเขน

เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

บิดาชื่อ นพอนันต์ มารดาชื่อ ประภาวัลย์

ได้ขอเปลี่ยนชื่อสกุลเป็น " เบญจปรีชาพัฒน์ "

กรณี เปลี่ยนชื่อสกุลตามบิดาซึ่งบิดาตั้งชื่อสกุลใหม่

นายทะเบียนได้อนุญาตตามคำขอที่ ๒๘๐/๒๕๕๔ ลงวันที่ ๔ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๔

จึงออกหนังสือสำคัญนี้ให้ไว้เป็นหลักฐาน

สำนักงานเขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร

ออก ณ วันที่ ๔ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๕๔

(นางปรณี เกื้อสกุล)

นายทะเบียนท้องที่

ประทับตราประจำตำแหน่งเป็นสำคัญ

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายพุฒิพัฒน์ เบญจปรีชาพัฒน์ (เดิมนายเอกพล อุดมกิจพิพัฒน์)
วันเดือนปีเกิด	22 มีนาคม 2522
สถานที่เกิด	ต. ท่าตะเภา อ. เมือง จ. ชุมพร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	34/89 ซ. วิภาวดี 60 ตลาดบางเขน หลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 114 ซ. สุขุมวิท 23 วัฒนา กรุงเทพฯ 10110

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2537	มัธยมศึกษาชั้นปีที่ 3 จากโรงเรียนสวนศรีวิทยา จ. ชุมพร
พ.ศ. 2540	มัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 จากโรงเรียนศรีพฤฒมา กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2543	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส. เคมีปฏิบัติการ-ปิโตรเคมี) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2545	ปริญญาตรี (วท.บ. เคมีวิเคราะห์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2555	ปริญญาโท (กศ.ม. อุตสาหกรรมศึกษา) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ