สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(15)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ที่มาความสำคัญ	1
1.2 ตรวจเอกสาร	2
1.2.1 ความสำคัญทางเศรษฐกิจของปาล์มน้ำมัน	2
1.2.2 ส่วนประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ	2
1.2.3 การผลิตเมทิลเอสเตอร์หรือไบโอดีเซล	3
1.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	6
1.2.5 ชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมัน	8
1.3 ทฤษฎีและหลักการ	12
1.3.1 กลไกการทำปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	12
1.3.2 ดุลมวลสาร	14
1.3.3 ดุลพลังงาน	14
1.3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีในเอกสารอ้างอิง	15
1.3.5 การแก้สมการอนุพันธ์สามัญ	18
1.3.6 ศึกษาหาปริมาณเมทานอลและพลังงานที่ใช้สำหรับการแยกกลับเมทานอล	19
1.3.7 การคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.3.8 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ระดับโรงงานนำร่อง	21
1.3.9 การวิเคราะห์ต้นทุนทางวิศวกรรม	24
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	27
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	27
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการโครงงานวิจัย	27
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
2.1วัสดุ	29
2.2 อุปกรณ์	29
2.3 วิธีการทดลอง	29
2.3.1 กำหนดสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายกระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์	29
2.3.2 เตรียมข้อมูลที่ใช้ในสมการอนุพันธ์	29
2.3.3 กำหนดวิธี (Algorithm) ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์	30
2.3.4 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	30
2.3.5 หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเตอร์	30
2.3.6 แผนผังของโปรแกรม	31
2.3.7 ศึกษาการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเตอร์	32
2.3.8 วิธีการหาความสัมพันธ์ของการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเมทิลเอสเตอร์	35
3. ผลการทดลองและวิจารณ์การผลการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการผลิตเมทิลเอสเตอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	
3.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการอนุพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ	36
3.1.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการทดลองของ Darnoko et al. (2000)	36
3.1.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

จากการทดลองของ Noureddini และ Zhu (1997)

3.2 ผลของอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 38

3.2.1 อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มส่งผลต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ 38

3.2.2 อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ 40

3.3 ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยา 43

3.3.1 อุณหภูมิของปฏิกิริยาส่งผลต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ 43

3.3.2 อุณหภูมิของปฏิกิริยาส่งผลต่อความดันภายในถังปฏิกรณ์ 43

3.3.3 อุณหภูมิของปฏิกิริยาส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ 44

3.4 ผลของเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 45

3.4.1 เวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ส่งผลต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ 45

3.4.2 เวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ 47

3.5 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเตอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง 47

3.5.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารภายในถังปฏิกรณ์ 49

3.5.2 ร้อยละของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ 51

3.5.3 ร้อยละของต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ 52

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเมทิลเอสเตอร์

4.1 อัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของสารผสมต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจมส่งผลต่อเวลาในการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเตอร์ 55

4.2 อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มส่งผลต่อเวลาในการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเตอร์ 57

4.3 รูปแบบฟังก์ชันลอจิสติก 59

4.4 รูปแบบฟังก์ชันลอจิสติกอย่างง่าย 64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลการทดลอง	66
ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	
ก. ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเตอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	71
ข. ผลการศึกษาการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเตอร์	77
ค. วิธีการวิเคราะห์และการคำนวณ	79
ง. หลักการใช้งานโปรแกรม Solver	86
จ. คุณสมบัติทางกายภาพ	88
ฉ. ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสาร	93
ช. ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน	95
ประวัติผู้เขียน	100

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สูตรโครงสร้างของกรดไขมัน	8
1.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช	9
1.3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช	10
1.4 มาตรฐานเมทิลเอสเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D 6751	11
1.5 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสาร	13
1.6 สูตรอย่างง่ายของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์ม	15
1.7 สูตรโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเตอร์ กลีเซอรอลและเมทานอล	16
1.8 ค่าความจุความร้อน ที่อุณหภูมิ 20 °C และค่าความร้อนการก่อเกิดของสาร ที่อุณหภูมิ 25 °C	17
1.9 ราคาวัตถุดิบและค่าไฟฟ้า	21
1.10 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล	26
3.1 สภาวะที่ทำให้ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 98.0	48
3.2 ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 8:1 อุณหภูมิของปฏิกิริยา 70 °C และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 30 นาที	52
4.1 ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติกและค่า R-square (ผลของอัตราส่วนของส่วนสูงของสารต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังแยกกลีเซอรอล)	57
4.2 ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติกและค่า R-square (ผลของอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม)	58
4.3 ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติกในรูปแบบอย่างง่าย	65
4.4 ค่า R-square ของการประมาณค่าความสูงของกลีเซอรอลที่เวลาต่างๆ โดยใช้ฟังก์ชันลอจิสติกรูปแบบอย่างง่าย	65
ก 1 ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์และต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์	71
ข 1 ความสูงของกลีเซอรอลที่เวลาต่างๆ ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1	77
ข 2 ความสูงของกลีเซอรอลที่เวลาต่างๆ ที่อัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของสารต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจมเท่ากับ 2.7	78

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค 1 ค่าความจุความร้อนและค่าความร้อนการก่อเกิดของสารที่มีโครงสร้างต่างๆ	83
ฉ 1 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสารจากการทดลองของ Noureddini และ Zhu (1997)	93
ฉ 2 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสารจากการทดลองของ D.Darnoko et al. (2000)	94
ฉ 3 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสารจากการทดลองของ Leevijit et al., (2004)	94
ช 1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548	97

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 วัสดุส่วนต่างๆที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรม	2
1.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR)	12
1.3 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	22
1.4 ความสัมพันธ์ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันกับปริมาณการผลิต	25
2.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	31
2.2 สารละลายเมทานอลกับโซเดียมไฮดรอกไซด์	32
2.3 การทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์แบบกะ	33
2.4 การแยกชั้นที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มต่างกัน	34
2.5 การแยกชั้นที่เส้นผ่าศูนย์กลางของถังตกจมต่างกัน	34
3.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของ Darnoko et al. (2000)	36
3.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของ Noureddini และ Zhu (1997)	37
3.3 ผลของอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์	38
3.4 ผลของอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มต่อต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์	40
3.5 ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์	43
3.6 ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อความดันภายในถังปฏิกรณ์	44
3.7 ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อหน่วย	44
3.8 ผลของเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์	45
3.9 ผลของเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ต่อต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อหน่วย	47
3.10 ความเข้มข้นของสารต่างๆภายในถังปฏิกรณ์ ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 8:1 อุณหภูมิของปฏิกิริยา 70 ^{o}C และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 30 นาที	50
3.11 ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 8:1 อุณหภูมิของปฏิกิริยา 70 ^{o}C และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 30 นาที	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่ **หน้า**

3.12 ร้อยละของต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน-ปาล์ม 8:1 อุณหภูมิของปฏิกิริยา 70 °C และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 30 นาที 53

3.13 ร้อยละของต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ส่วนค่าพลังงาน ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 8:1 อุณหภูมิของปฏิกิริยา 70 °C และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 30 นาที 54

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 55

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ใช้กระบอกตวงปริมาตร 500 มิลลิลิตรเป็นถังตกจม 57

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 250 มิลลิลิตร 60

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 500 มิลลิลิตร 60

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 1000 มิลลิลิตร 61

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 10:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 500 มิลลิลิตร 61

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 15:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 500 มิลลิลิตร 62

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 8:1 62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่ **หน้า**

ใช้กระบอกตวงปริมาตร 250 มิลลิลิตร

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอล สูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 8:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 500 มิลลิลิตร 63

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอล สูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 250 มิลลิลิตร 63

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอล สูงสุดกับเวลาในการแยกชั้น ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ใช้กระบอกตวงปริมาตร 500 มิลลิลิตร 64

ง 1 ตำแหน่งเซลล์ต่างๆ ของโปรแกรม Solver 87

ตัวย่อและสัญลักษณ์

ตัวย่อ

CPO	คือ Crude Palm Oil
CSTR	คือ Continuous Stirred Tank Reactor
FFAs	คือ Free Fatty Acids
HPLC	คือ High Performance Liquid Chromatography
TLC	คือ Thin Layer Chromatography

สัญลักษณ์

a	คือ ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติก
A	คือ เมทานอล (mol/L)
A	คือ แฟคเตอร์ความถี่ (Frequency factor)
A	คือ ค่าคงที่ของสมการอังตวน
B	คือ ค่าคงที่ของสมการอังตวน
C	คือ ค่าคงที่ของสมการอังตวน
C_i	คือ ความเข้มข้นของสาร (mol/L)
C_p	คือ ค่าความจุความร้อน (cal/mol.K)
DG	คือ ไดกลีเซอร์ไรด์ (mol/L)
E_a	คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (cal/mol)
E_{sys}	คือ พลังงานของระบบ (cal)
F_{io}	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (mol/min)
F_i	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารออกจากถังปฏิกรณ์ (mol/min)
H/H_{max}	คือ อัตราส่วนของความสูงของกลีเซอรอลต่อส่วนสูงของกลีเซอรอลสูงสุด
ΔH_f	คือ ค่าความร้อนการก่อเกิดของสาร (cal/mol)
ΔH_{Rx}	คือ ค่าความร้อนการเกิดปฏิกิริยา (cal/mol)
k	คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (L/mol.s)
L_v	คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของเมทานอล (cal/g)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

$\dot{Q}$	คือ อัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อน (cal/min)
Q	คือ พลังงานความร้อนของสารทั้งหมด (cal)
Q_v	คือ พลังงานความร้อนของสารในการเปลี่ยนสถานะ (cal)
m	คือ ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติก
m	คือ จำนวนโมลของสาร (mol)
ME	คือ เมทิลเอสเตอร์ (mol/L)
MG	คือ โมโนกลีเซอไรด์ (mol/L)
n	คือ ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติก
n	คือ จำนวนชุดของข้อมูลจริง
p	คือ ค่าคงที่ของฟังก์ชันลอจิสติก
P	คือ ความดันไอของเมทานอล (mmHg)
r_i	คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (mol/L.min)
R	คือ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (cal/mol.K)
t	คือ เวลา (นาที)
T	คือ อุณหภูมิ (K)
TG	คือ ไตรกลีเซอร์ไรด์ (mol/L)
τ_m	คือ เวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ (min)
V	คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (L)
v_0	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (L/min)
$\dot{W}$	คือ อัตราการถ่ายโอนงาน (cal/min)
Y_i	คือ ค่าของข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง
$\hat{Y}_i$	คือ ค่าของการประมาณ
Θ_i	คือ อัตราส่วนเชิงโมล