

สารบัญ		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ฉ
สารบัญตาราง		ฎ
สารบัญภาพ		ฏ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
	1.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	12
	1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	13
	1.5 ขอบเขตการศึกษา	13
	1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15
บทที่ 2	หลักการและทฤษฎี	17
	2.1 ปาล์มน้ำมัน	17
	2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	25
	2.2.1 ประเภทของไบโอดีเซล	25
	2.2.2 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล	25
	2.3 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)	30
	2.4 การวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ (Energy Footprint)	32
	2.4.1 ค่าพลังงานสุทธิ (Net Energy Value: NEV)	33
	2.4.2 อัตราส่วนพลังงาน (Net Energy Ratio: NER)	33
	2.5 การวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint: WF)	35
	2.5.1 แนวคิดของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์	35
	2.5.2 หลักการวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์	36
	2.5.3 ขั้นตอนในการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์	37
	2.5.2 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน	45
2.6.1 สมดุลมวล (Mass balance)	45
2.6.2 สมดุลพลังงาน (Energy balance)	45
2.7 การปันส่วน (Allocation Method)	45
2.7.1 หลักการปันส่วน	46
2.7.2 กฎการปันส่วน	46
<b>บทที่ 3</b> <b>วิธีการศึกษาวิจัย</b>	<b>48</b>
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	48
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัยในการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต	51
3.2.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต	51
3.2.2 การกำหนดหน่วยหน้าที่การศึกษา	52
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัยในการคัดเลือกพื้นที่ศึกษา	52
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัยในการจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory)	52
3.4.1 บัญชีรายการในขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ	53
3.4.2 บัญชีรายการในช่วงการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	54
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัยในการวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์	55
3.5.1 พลังงานที่ใช้ในการเพาะปลูก	55
3.5.2 พลังงานที่ใช้ในการขนส่ง	56
3.5.3 พลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	56
3.5.4 พลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล	57
3.5.5 พลังงานที่ใช้ตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซล	57
3.6 วิธีการดำเนินการวิจัยในการวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของ ไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	57
3.6.1 การวิเคราะห์การคายระเหยน้ำของพืช	58
3.6.2 การวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืช	61
3.6.3 การวิเคราะห์กรวยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืช	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.4 การวิเคราะห์หัวแอมโมเนียมไนเตรตของพืช	62
3.6.5 การวิเคราะห์กรีนและบลูแอมโมเนียมไนเตรตของผลิตภัณฑ์	62
3.6.6 การวิเคราะห์แอมโมเนียมไนเตรตของผลิตภัณฑ์	62
3.6.7 การวิเคราะห์หัวแอมโมเนียมไนเตรตของผลิตภัณฑ์	63
3.7 วิธีการดำเนินการวิจัยในการวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์และ แอมโมเนียมไนเตรตสำหรับไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันและแนวทางใน การจัดการเพื่อลดปริมาณที่เกิดขึ้น	63
3.7.1 การวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ในแต่ละกระบวนการ	63
3.7.2 การวิเคราะห์หัวแอมโมเนียมไนเตรตในแต่ละกระบวนการ	64
3.7.3 หาแนวทางในการจัดการเพื่อลดปริมาณพลังงานและน้ำ ที่เกิดขึ้น	64
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย</b>	<b>65</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการ (Life Cycle Inventory Analysis: LCI)	65
4.1.1 ผลการจัดทำบัญชีรายการในขั้นตอนการเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน	66
4.1.2 ผลการจัดทำบัญชีรายการในขั้นตอนการขนส่ง	71
4.1.3 ผลการจัดทำบัญชีรายการในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	73
4.1.4 ผลการจัดทำบัญชีรายการในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล	77
4.2 ผลการวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ (Energy Footprint: EF)	85
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานในขั้นตอนการเพาะปลูก	85
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานในขั้นตอนการขนส่ง	87
4.2.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานในขั้นตอนการสกัดน้ำมัน ปาล์มดิบ	88
4.2.4 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล	89
4.2.5 ผลการวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ตลอดวงจรชีวิตของการ ผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน (หน่วยการทางาน: ไบโอดีเซล 1 ลิตร)	90

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน (หน่วยการทางาน: ไบโอดีเซล 1 ลิตร)	91
4.2.7 ผลการเปรียบเทียบค่าเอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ของการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	93
4.3 ผลการวิเคราะห์ห่อเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint: WF)	94
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ห่อเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน	95
4.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าห่อเตอร์ฟุตพริ้นท์ของปาล์มน้ำมันกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	100
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ห่อเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	101
4.4 การวิเคราะห์แนวทางการจัดการพลังงานและน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตในการผลิตไบโอดีเซล	105
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษาวิจัย	112
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ในรูปค่าพลังงานสุทธิตลอดวัฏจักรชีวิตการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	112
5.2 สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ห่อเตอร์ฟุตพริ้นท์ตลอดวัฏจักรชีวิตการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	114
5.3 สรุปและวิจารณ์แนวทางการจัดการพลังงานและน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันอย่างเหมาะสม	115
5.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัย	116
บรรณานุกรม	117
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลบัญชีรายการสารขาเข้า – ออก	122
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน	133
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ปริมาณห่อเตอร์ฟุตพริ้นท์	138

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์จากระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์	159
ภาคผนวก จ แบบสำรวจข้อมูลการเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน	164
ภาคผนวก ฉ บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	177
ประวัติผู้เขียน	192

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	สมมูลปริมาณน้ำมันปาล์มดิบของประเทศไทยตั้งแต่ปี 2550-2554	2
1.2	พลังงานที่ใช้ในการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทต่างๆ	5
1.3	การวิเคราะห์วอเตอร์และเอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ของข้าวสาลี ข้าว และข้าวบาร์เลย์	7
1.4	วิธีการดำเนินการวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	15
2.1	ความเหมาะสมของพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมัน	18
2.2	ลักษณะการเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมัน	22
3.1	บัญชีรายการเก็บข้อมูลการใช้วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากรในขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ	53
3.2	บัญชีรายการเก็บข้อมูลของการขนส่งในขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ	53
3.3	บัญชีรายการเก็บข้อมูลการใช้วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากรในขั้นตอนของการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	54
4.1	บัญชีรายการสารขาเข้า-ออกของกระบวนการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้ต่อหน่วยการทำงาน	67
4.2	บัญชีรายการสารขาเข้า-ออกของกระบวนการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคเหนือต่อหน่วยการทำงาน	69
4.3	บัญชีรายการการขนส่งปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้ต่อหน่วยการทำงาน	71
4.4	บัญชีรายการการขนส่งปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคเหนือต่อหน่วยการทำงาน	72
4.5	บัญชีรายการสารขาเข้า-ออกของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบต่อหน่วยการทำงาน	75
4.6	บัญชีรายการสารขาเข้า-ออกของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วยการทำงาน	81
4.7	ค่าการคายระเหยน้ำบาดลและกรีนของการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ศึกษา	96
4.8	ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันแต่ละจังหวัดในพื้นที่ภาคใต้	97
4.9	ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันแต่ละจังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือ	99
4.10	ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน 1 ลิตร	103
4.11	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเปลือกปาล์มน้ำมันต่อหน่วยการทำงาน	106
ก-1	บัญชีรายการสารขาเข้า-ออกของการอนุบาลต้นกล้า	124

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ก-2	บัญชีรายการของการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้	125
ก-3	บัญชีรายการของการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคเหนือ	126
ก-4	บัญชีรายการสาขาเข้า-ออกของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	127
ก-5	บัญชีรายการสาขาเข้า-ออกของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 1 แบท (ขนาดกำลังการผลิต 5,000 ลิตร)	129
ข-1	ค่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมดการผลิตตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซล	134
ข-2	ค่าพลังงานที่ได้ทั้งหมดการผลิตตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซล	135
ข-3	ค่าพลังงานปัจจัยการผลิตตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซล	136
ข-4	ค่าพลังงานความร้อนของพลังงานปฐมภูมิ	137
ข-5	ปริมาณพลังงานปฐมภูมิที่ใช้ในการผลิตปัจจัยการผลิตตลอดวัฏจักรชีวิต	137
ค-1	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันต่อพื้นที่เพาะปลูก	139
ค-2	ค่าการคายระเหยอ้างอิงของพีช (ET <sub>o</sub> ) ของจังหวัดกระบี่	146
ค-3	ค่าการระเหยน้ำอ้างอิงของพีช (ET <sub>o</sub> ) ในพื้นที่ที่ทำการศึกษา	148
ค-4	ข้อมูลปาล์มน้ำมัน (ในเขตเส้นศูนย์สูตร)	151
ค-5	ค่าการคายระเหยน้ำของปาล์มน้ำมันของจังหวัดกระบี่	153
ค-6	ค่าประสิทธิภาพฝนใช้การในพื้นที่ที่ทำการศึกษา	154
ค-7	ปริมาณการใช้ปุ๋ยและปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อการชะล้างปุ๋ยที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ	156
ค-8	ค่ากรีนและบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	157
ค-9	การวิเคราะห์การใช้น้ำในการบำบัดน้ำเสียของการผลิตไบโอดีเซล	158
ค-10	การวิเคราะห์เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของไบโอดีเซล	158
ง-1	กลุ่มชุดดินและลักษณะของเนื้อดินตามพื้นที่ที่ศึกษา (ภาคใต้)	160
ง-1	กลุ่มชุดดินและลักษณะของเนื้อดินตามพื้นที่ที่ศึกษา (ภาคเหนือ)	163

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1	6
1.2	9
1.3	10
1.4	11
1.5	11
1.6	13
2.1	20
2.2	22
2.3	27
2.4	27
2.5	28
2.6	29
กสิเชอริน	
2.7	30
2.8	36
2.9	39
2.10	43
2.11	44
2.12	46
2.13	47
2.14	47
3.1	50

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
3.2	ขอบเขตของระบบในการศึกษาการวิเคราะห์เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของ ไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน	51
4.1	แผนภาพแสดงกระบวนการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้ต่อหน่วยการทำงาน	68
4.2	แผนภาพแสดงกระบวนการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคเหนือต่อหน่วยการทำงาน	70
4.3	แผนภาพแสดงองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	75
4.4	แผนภาพแสดงกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มต่อหน่วยการทำงาน	76
4.5	แผนภาพแสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	80
4.6	แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วยการทำงาน (ไบโอดีเซล 1 ลิตร)	82
4.7	แผนภาพแสดงปริมาณสารขาเข้า-ขาออกตลอดวัฏจักรชีวิตในการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร โดยใช้วัตถุดิบปาล์มน้ำมันจากพื้นที่ภาคใต้	83
4.8	แผนภาพแสดงปริมาณสารขาเข้า-ขาออกตลอดวัฏจักรชีวิตในการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร โดยใช้วัตถุดิบปาล์มน้ำมันจากพื้นที่ภาคเหนือ	84
4.9	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร	86
4.10	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร	87
4.11	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสกัดน้ำมันปาล์มดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร	88
4.12	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร	89
4.13	ปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร จากวัตถุดิบปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ	90
4.14	ปริมาณเอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นท์ของการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตจากวัตถุดิบปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ	92
4.15	อัตราส่วนพลังงานสุทธิของการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตจากวัตถุดิบปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ	93
4.16	การเปรียบเทียบอัตราส่วนพลังงานของการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบปาล์มน้ำมันร่วมกับผลิตภัณฑ์ร่วม	94
4.17	กราฟแสดงค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันแต่ละจังหวัดในพื้นที่ภาคใต้	98

## สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
4.18	กราฟแสดงค่าอัตรปุ๋ยฟอสฟอรัสที่การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันแต่ละจังหวัดในพื้นที่ภาคใต้	99
4.19	ปริมาณอัตรปุ๋ยฟอสฟอรัสของปาล์มน้ำมันในพื้นที่ศึกษาเทียบกับประเทศต่างๆ ประกอบด้วย ประเทศฮอนดูรัส อินโดนีเซีย มาเลเซีย (Lienden et al., 2010) ฟิลิปปินส์ (F. Bulsink et al., 2010) และค่าเฉลี่ยโลก (Mekonnen and Hoekstra, 2011) ซึ่งคำนวณเฉพาะกรีนและบลูอัตรปุ๋ยฟอสฟอรัส	100
4.20	แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันพร้อมค่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และสัดส่วนราคาต่อขั้นตอนการผลิต	102
4.21	กราฟแสดงค่าอัตรปุ๋ยฟอสฟอรัสของไบโอดีเซล 1 ลิตร จากวัตถุดิบปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ	104
4.22	การเปรียบเทียบผลการศึกษา 2 ด้าน ตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร จากวัตถุดิบปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ	105
4.23	การวิเคราะห์ค่าความไวของปัจจัยที่มีผลความสัมพันธ์ต่อการใช้พลังงาน	106
4.24	การวิเคราะห์ค่าความไวของปัจจัยที่มีผลความสัมพันธ์ต่อการใช้น้ำ	107
4.25	การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการขนส่งวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลระหว่างรถบรรทุกขนาดเดิมและเพิ่มขนาดความจุของรถบรรทุก (รถบรรทุกกึ่งพ่วง 18 ล้อ ขนาด 32 ตัน)	110
ค-1	กราฟแสดงแนวโน้มของปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันตลอดวัฏจักรชีวิต	141
ค-2	ปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันตลอดวัฏจักรชีวิตเฉลี่ยในพื้นที่ภาคใต้ (ต้นต่อปี)	141
ค-3	ปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันตลอดวัฏจักรชีวิตเฉลี่ยในพื้นที่ภาคเหนือ (ต้นต่อปี)	142