การประเมินค่าเอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากวัตถุดิบต่าง ๆ และแอลกอฮอล์สองชนิด

นางสาวปรารถนา นิมมานเทอดวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EMERGY EVALUATION OF BIODIESEL PRODUCTION IN THAILAND FROM VARIOUS FEEDSTOCKS AND TWO TYPES OF ALCOHOL

Miss Prathana Nimmanterdwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Chemicals Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าเอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากวัตถุดิบต่าง ๆ และแอลกอฮอล์สองชนิด
โดย	นางสาวปรารถนา นิมมานเทอดวงศ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

……กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ)

ปรารถนา นิมมานเทอดวงศ์ : การประเมินค่าเอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากวัตถุดิบต่าง ๆ และแอลกอฮอล์สองชนิด . (EMERGY EVALUATION OF BIODIESEL PRODUCTION IN THAILAND FROM VARIOUS FEEDSTOCKS AND TWO TYPES OF ALCOHOL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์,188หน้า.

ความต้องการพลังงานในปัจจุบันเพิ่มสูงขึ้นในทุกปี และเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือศึกษาการนำไบโอดีเซลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับการขนส่งในประเทศไทย ซึ่งอาจสร้างทางออกสู่ความยั่งยืนของพลังงานในอนาคตได้ งานวิจัยนี้เปรียบเทียบภาวะของการผลิตไบโอดีเซลที่แตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 7 กรณีศึกษา โดยใน 3 กรณีแรกจะเป็นข้อมูลกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย และ 4 กรณีหลังเป็นข้อมูลจากการจำลองกระบวนการมีการเปรียบเทียบสารตั้งต้นสองชนิดซึ่งได้แก่ ปาล์มน้ำมัน และสบู่ดำ ซึ่งกรณีศึกษาทั้งหมดจะนำไปประเมินเอเมอร์จีซึ่งมีตัวชี้วัด ได้แก่ ส่วนที่หมุนเวียนได้ (PR) ผลได้ของเอเมอร์จี (EYR) ภาระที่สิ่งแวดล้อมได้รับ (ELR) และตัวชี้วัดความยั่งยืน (ESI) กรณีศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยที่ให้ผลดีที่สุดคือกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันในระบบต้นแบบ และสำหรับแบบจำลองคือกรณีที่ 7 ซึ่งเป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากเมทานอลที่ได้ในระบบผ่านกระบวนการทั่วไปซึ่งมีระบบผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำเพิ่มเข้ามา มีตัวชี้วัดดังนี้ PR20% (กรณีที่ 1)26% (กรณีที่ 7) EYR1.38 (กรณีที่ 1)1.65 (กรณีที่ 7) ELR3.94 (กรณีที่ 1)2.44 (กรณีที่ 7) ESI0.35 (กรณีที่ 1) และ 0.52 (กรณีที่ 7) ผลการประเมินเอเมอร์จีพบว่าความยั่งยืนของระบบปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่ดีพอ เนื่องจากมีการใช้ทรัพยากรไม่หมุนเวียนเป็นปริมาณมาก

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554

5372278723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS : EMERGY EVALUATION / BIODIESEL PRODUCTION / BIOFUELS PRODUCTION

PRATHANA NIMMANTERDWONG: EMERGY EVALUATION OF BIODIESEL PRODUCTION IN THAILAND FROM VARIOUS FEEDSTOCKS AND TWO TYPES OF ALCOHOL.ADVISOR: ASSOC.PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D.,188pp.

Energy demand in Thailand has steadily increased over the years. The aim of this study is to investigate whether the use of biodiesel, as the alternative transportation fuels in Thailand, could provide a sustainable solution for the future energy. The study is to compare various environmental inventories from various processes. This work studied on 7 cases, the first 3 cases based on biodiesel production in Thailand and the last 4 cases were from the simulation data. Two sources of biomass feedstock, oil palm and Jatropha (JCL), have been investigated. The emergy indicators such as percent renewable (PR), emergy yield ratio (EYR), environmental loading ratio (ELR) and environmental sustainability index (ESI) were calculated. It is found that the best case of biodiesel production in Thailand is case 1 or the biodiesel production from oil palm in pilot scale and the best case of simulation process is case 7 or the simulation of biodiesel production using co-product methanol via conventional process with additional electricity and steam generator zone. Emergy indices of case 1 and 7 are shown as follows: PR, 20% (case 1),26% (case 7); EYR, 1.38 (case 1), 1.65 (case 7); ELR, 3.94 (case 1), 2.44 (case 7); ESI, 0.35 (case 1) and 0.52 (case 7). The results show that the sustainability of present system is still insufficient since large amount of non-renewable sources have been consumed.

Department : Chemical Technology Student's Signature .....
Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature .....
Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์การประเมินค่าเอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากวัตถุดิบต่าง ๆ และแอลกอฮอล์สองชนิดฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยนี้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร .เก็จวลี พฤกษาทรประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์และรองศาสตราจารย์ ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือที่อบอุ่น ด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย 3

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 3

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย 4

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 ความหมายของเอเมอร์จี 6

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับเอเมอร์จี 6

2.2.1 ทรานส์ฟอร์มิตี(Transformity) 8

2.2.2 แผนผังเอเมอร์จี 8

2.2.3 ตัวชี้วัดความยั่งยืน 10

2.2.4 ขั้นตอนการประเมินเอเมอร์จี 12

2.3 ไบโอดีเซล 15

2.3.1 ศักยภาพไบโอดีเซลในประเทศไทย 15

2.3.2 ชีวมวลที่นำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ 16

2.3.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล 17

หน้า

2.4 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม 18
2.4.1 การปลูก (Agricultural phase) 18
2.4.2 การใส่ปุ๋ยและยาฆ่าแมลง 19
2.4.3 การหว่านเมล็ด 19
2.4.4 การผลิตน้ำมันปาล์ม 19
2.4.5 การขนส่ง 19
2.4.6 พลังงานของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 20
2.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันขนาดต้นแบบ 21
2.5.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในระบบต้นแบบ 21
2.6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันขนาดอุตสาหกรรม 22
2.6.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในระบบอุตสาหกรรม 22
2.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ 23
2.7.1 การปลูก 23
2.7.2 การผลิตน้ำมันสบู่ดำ 23
2.7.3 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ 23
2.7.4 การขนส่ง 23
2.8 ไบโอเอทานอล 24
2.8.1 การบวนการผลิตแอลกอฮอล์ 26

3 การคำนวณเอเมอร์จีและการจำลองกระบวนการ 29
3.1 การคำนวณเอเมอร์จี 29
3.2 การคำนวณดัชนีความยั่งยืน 34
3.3 การจำลองกระบวนการ 35
3.4 ข้อมูลที่ใช้คำนวณในงานวิจัย 37

4 ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล 46
4.1 ผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย 47
4.1.1 ผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย 48

หน้า

4.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดอุตสาหกรรม 57
4.1.3 กรณีศึกษาที่ 3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำขนาดต้นแบบ..63
4.2 เปรียบเทียบผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย.72
4.2.1 เปรียบเทียบผลของขนาดกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 72
4.2.2 เปรียบเทียบผลของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล 74
4.3 ผลการประเมินเอเมอร์จีของการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS® 76
4.3.1 กรณีศึกษาที่ 4 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....77
4.3.2 กรณีศึกษาที่ 5 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากแอลกอฮอล์ แบบที่ 1 82
4.3.3 กรณีศึกษาที่ 6 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยแอลกอฮอล์ แบบที่ 2 93
4.3.4 กรณีศึกษาที่ 7 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยแอลกอฮอล์ แบบที่ 2 ปรับปรุง.....103
4.4 เปรียบเทียบผลการประเมินเอเมอร์จีของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 108
4.4.1 เปรียบเทียบผลของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยและแบบจำลอง กระบวนการ 108
4.4.2 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 110
4.4.3 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง 112
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....115
5.1 สรุปผลการวิจัย.....115
5.1.1 ผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย 115
5.1.2 ผลการประเมินเอเมอร์จีของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....116
5.2 ข้อเสนอแนะ.....117

หน้า

รายการอ้างอิง 119
ภาคผนวก 124
ภาคผนวก ก การคำนวณและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย 125
ภาคผนวก ข แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 157
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 173

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1ความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ.....9
ตารางที่ 2.2ตัวอย่างการคำนวณเอเมอร์จีของสายป้อนเข้า.....13
ตารางที่ 2.3เชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลต่างๆ.....16
ตารางที่ 2.4เปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....18
ตารางที่ 2.5สรุปต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ.....21
ตารางที่2.6สรุปต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม.....22
ตารางที่ 2.7ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวล.....25
ตารางที่ 2.8ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปช์ของการสังเคราะห์แอลกอฮอล์25
ตารางที่ 3.1รูปแบบตารางการคำนวณเอเมอร์จี.....31
ตารางที่ 3.2ข้อมูลสำหรับขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 24 5 6 และ 7.....37
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสำหรับขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 1.....40
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลสำหรับขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 2.....41
ตารางที่ 3.5 ข้อมูลสำหรับขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3.....42
ตารางที่ 3.6 ข้อมูลสำหรับขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 3.....44
ตารางที่ 4.1กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้.....46
ตารางที่ 4.2ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 2 4 5 และ 6.....51
ตารางที่ 4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 2 4 5 และ 6.....53
ตารางที่ 4.4 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 1.....54
ตารางที่ 4.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 1.....54
ตารางที่ 4.6 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 1.....55
ตารางที่ 4.7 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 1.....55
ตารางที่ 4.8ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 1.....57
ตารางที่ 4.9 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 2.....59
ตารางที่ 4.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 2.....60
ตารางที่ 4.11 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 2.....60
ตารางที่ 4.12 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 2.....61
ตารางที่ 4.13ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 2.....62

หน้า

ตารางที่ 4.14 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3 65
ตารางที่ 4.15 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3.....67
ตารางที่ 4.16 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 3.....68
ตารางที่ 4.17 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 3 68
ตารางที่ 4.18 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 3 69
ตารางที่ 4.19 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 3 69
ตารางที่ 4.20ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 3.....71
ตารางที่ 4.21ผลของขนาดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อดัชนีความยั่งยืนของระบบ.....73
ตารางที่ 4.22ผลของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลต่อดัชนีความยั่งยืนของระบบ.....75
ตารางที่ 4.23 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 4.....78
ตารางที่ 4.24 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 4 79
ตารางที่ 4.25 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 4 79
ตารางที่ 4.26 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 4 80
ตารางที่ 4.27ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 4.....81
ตารางที่ 4.28 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5 83
ตารางที่ 4.29 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5.....84
ตารางที่ 4.30 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ใน
กรณีศึกษาที่ 5 84
ตารางที่ 4.31 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5.....85
ตารางที่ 4.32ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5 85
ตารางที่ 4.33 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5.....88
ตารางที่ 4.34 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5.....89
ตารางที่ 4.35 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลใน
กรณีศึกษาที่ 5 89
ตารางที่ 4.36 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5.....90
ตารางที่ 4.37ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5.....92
ตารางที่ 4.38 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6 94
ตารางที่ 4.39 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6.....95

หน้า

ตารางที่ 4.40 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ใน
กรณีศึกษาที่ 6 95
ตารางที่ 4.41 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6..... 97
ตารางที่ 4.42ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6 97
ตารางที่ 4.43 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6..... 99
ตารางที่ 4.44 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6..... 100
ตารางที่ 4.45 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลใน
กรณีศึกษาที่ 6 100
ตารางที่ 4.46 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6..... 101
ตารางที่ 4.47ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6..... 103
ตารางที่ 4.48 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนที่ 5 ของกรณีศึกษาที่ 7 104
ตารางที่ 4.49 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ใน
กรณีศึกษาที่ 7 105
ตารางที่ 4.50 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 7..... 105
ตารางที่ 4.51ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 7 107
ตารางที่ 4.52ผลของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขนาดอุตสาหกรรมและ
แบบจำลองกระบวนการต่อดัชนีความยั่งยืนของระบบ 109
ตารางที่ 4.53ดัชนีความยั่งยืนของระบบในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6..... 112
ตารางที่ ก.1 ดัชนีความยั่งยืนของระบบในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6..... 120

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่2.1แผนผังกระบวนการเกิดท่อนซุงในป่าสนประเทศสวีเดนในพื้นที่ขนาด 1 เฮคแทร์....6
ภาพที่2.2แผนผังเปรียบเทียบระหว่างระบบพลังงานและระบบเอเมอร์จี ก) แผนผังกระบวนการแปลงพลังงาน ข) เอเมอร์จีและทรานส์ฟอร์มิตี 7
ภาพที่2.3ลำดับการเปลี่ยนรูปพลังงาน (ก) แผนผังการกระจายพลังงานในแต่ละส่วน (ข) กราฟแท่งของพลังงานในแต่ละขั้น (ค) กราฟแท่งของทรานส์ฟอร์มิตีในแต่ละขั้น.....10
ภาพที่2.4แผนผังสรุปเอเมอร์จีในระบบทั่วไป 11
ภาพที่2.5 แผนผังเอเมอร์จีของระบบผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ.....12
ภาพที่2.6วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ก) เมล็ดสบู่ดำ ข) เมล็ดปาล์ม.....15
ภาพที่2.7ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน 17
ภาพที่2.8ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....17
ภาพที่2.9แผนผังระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ 20
ภาพที่3.1 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 31
ภาพที่3.2 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลสองขั้นก) ขั้นการปลูก ข) ขั้นการผลิตไบโอดีเซล 32
ภาพที่3.3แผนผังการคำนวณ.....33
ภาพที่ 3.4แผนผังตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ.....34
ภาพที่4.1การกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 1 56
ภาพที่4.2การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 1 56
ภาพที่4.3แสดงการกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 2.....61
ภาพที่4.4การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 2 62
ภาพที่4.5การกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 3 70
ภาพที่4.6การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 3 70
ภาพที่4.7ผลของขนาดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อการกระจายตัวของเอเมอร์จี.....73
ภาพที่4.8ผลของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลต่อการกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการปลูก...75
ภาพที่4.9การกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 4 80
ภาพที่4.10การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 4 81
ภาพที่4.11การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์กรณีศึกษาที่ 5 86

หน้า

ภาพที่4.12การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์กรณีศึกษาที่ 5.....86
ภาพที่4.13การกระจายตัวของเอเมอร์จีในกรณีศึกษาที่ 5 91
ภาพที่4.14การกระจายตัวของทรัพยากรในกรณีศึกษาที่ 5.....91
ภาพที่4.15การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์กรณีศึกษาที่ 6 96
ภาพที่4.16การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์กรณีศึกษาที่ 6.....96
ภาพที่4.17การกระจายตัวของเอเมอร์จีในกรณีศึกษาที่ 6 102
ภาพที่4.18การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตไบโอดีเซลกรณีศึกษาที่ 6.....102
ภาพที่4.19การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์กรณีศึกษาที่ 7 106
ภาพที่4.20การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์กรณีศึกษาที่ 6.....106
ภาพที่4.21การกระจายตัวของเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขนาดอุตสาหกรรมและแบบจำลองกระบวนการ.....109
ภาพที่4.22การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 111
ภาพที่4.23การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 111

บทที่ 1

บทนำ

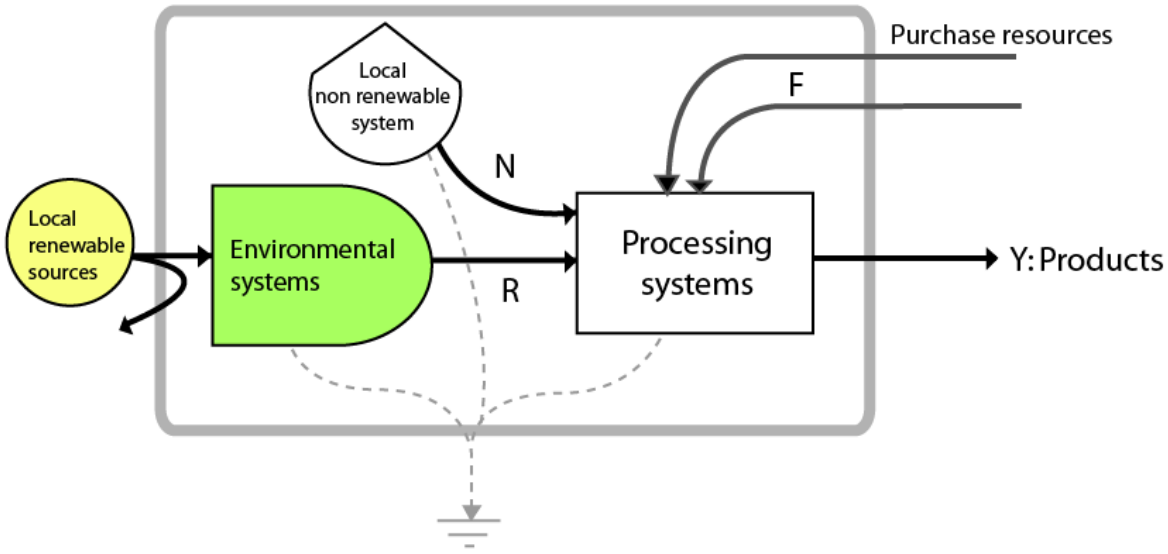
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้พืชเกษตรกรรมมาเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อหวังจะให้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจะต้องตอบโจทย์สำคัญสามประการ ประการแรกพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหล่านี้มีปริมาณมากพอที่จะลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้มากน้อยเพียงใด และปริมาณพืชเกษตรกรรมที่มีเพียงพอกับความต้องการบริโภคของประชากรในประเทศหรือไม่ ประการที่สองราคาเชื้อเพลิงทดแทนนี้สมเหตุสมผลหรือไม่ ประการที่สามผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่มาจากน้ำมันพืชสองชนิดคือปาล์มและสบู่ดำ กับแอลกอฮอล์สองชนิดคือเมทานอลที่นิยมใช้ในปัจจุบันกับไบโอแอลกอฮอล์จากชีวมวล เพื่อศึกษาว่าหากใช้แอลกอฮอล์ที่ได้จากชีวมวลจะช่วยลดผลกระทบในแง่ลบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากน้อยเพียงใด

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลมีหลายกระบวนการและใช้วัตถุดิบหลายชนิด โดยปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขณะนี้ เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ปริมาณน้ำมันสูงที่สุดในบรรดาพืชให้น้ำมัน [1] และพืชที่เป็นที่สนใจรองลงมาคือสบู่ดำ เพื่อใช้ทดแทนการใช้ปาล์ม น้ำมัน เพียงอย่างเดียว นำมาซึ่ง ปัญหาการขาดแคลน ในอนาคต นอกจากน้ำมันพืช แอลกอฮอล์ก็ถือเป็นวัตถุดิบที่ต้องให้ความสำคัญในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำมันพืชจะมีส่วนกากใยหรือเปลือกที่เหลือจากการสกัดน้ำมันซึ่งในส่วนนี้สามารถนำไป เป็นวัตถุดิบผลิตเป็นเอทานอล นอกจาก นี้ไบโอเอทานอลยังสามารถผลิตได้จากพืชเกษตรอื่นเช่น มันสำปะหลัง อ้อย เป็นต้น ซึ่งแอลกอฮอล์เหล่านี้สามารถนำมาใช้แทนเมทานอลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้

การวิเคราะห์เอเมอร์จี (Emergy analysis) เป็นกระบวนการที่แสดงให้เห็นถึงความยั่งยืนของระบบและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีตัวชี้วัดได้แก่ PR (Percent renewable) เป็นตัวบอกว่าแต่ละส่วนของกระบวนการภายในระบบใช้เอเมอร์จีหมุนเวียน (Renewable emergy) ไปเป็นสัดส่วนเท่าไร การใช้เอเมอร์จีไม่หมุนเวียน (Non-renewable emergy) ถือเป็นการสร้างภาระให้กับสิ่งแวดล้อม ตัวชี้วัดที่สอง EYR (Emergy yield ratio) เป็นสัดส่วนระหว่างเอเมอร์จีทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง

กับระบบเทียบกับเอเมอร์จีภายนอกที่นำเข้ามาป้อนให้กับระบบ (Purchased resources) เช่น ปุ๋ยไนโตรเจน ยาฆ่าแมลง แรงงานและวัสดุ สารเคมี เป็นต้น หากมีค่าน้อยหรือเข้าใกล้หนึ่งแสดงว่าระบบพึ่งพาทรัพยากรจากภายนอกมาก ELR (Environmental load ratio) เป็นสัดส่วนระหว่างเอเมอร์จีไม่หมุนเวียนและเอเมอร์จีจากภายนอกเทียบกับเอเมอร์จีหมุนเวียนในระบบ แสดงถึงปริมาณภาระของสิ่งแวดล้อม และสุดท้าย ESI (Emergy sustainability index) เป็นอัตราส่วนระหว่าง EYR ต่อ ELR ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าระบบที่ศึกษามีความยั่งยืนมากน้อยเพียงใด หากค่า ESI น้อยแสดงว่าระบบประพฤติตัวเป็นผู้รับ และใช้ทรัพยากรจากสิ่งแวดล้อมสูง โดยแผนผังด้านล่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการหนึ่งกับสิ่งแวดล้อม



1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษา ปริมาณพลังงานที่ลงทุนโดยธรรมชาติ ของการใช้น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลระดับอุตสาหกรรม
2. เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างการใช้เมทานอลและไบโอแอลกอฮอล์ในการผลิตไบโอดีเซล
3. ประเมินตัวชี้วัดความยั่งยืนของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันสบู่ดำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาความยั่งยืนของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ความรู้เรื่องการวิเคราะห์เอเมอร์จีซึ่งเป็นแนวคิดใหม่เพื่อแสดงผลกระทบที่มีต่อทั้งทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมได้ชัดเจนกว่าวิธีวิเคราะห์วัฏจักรชีวิต (Life cycle analysis) ที่ใช้กันในปัจจุบัน
2. ศึกษากระบวนการผลิตไบโอเอทานอลและการนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. ประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มและสบู่ดำ
2. วิเคราะห์กระบวนการผลิตขนาดอุตสาหกรรมเทียบกับขนาดต้นแบบ
3. จำลองกระบวนการผลิตไบโอแอลกอฮอล์จากกากปาล์มผ่านปฏิกิริยาการหมัก (Fermentation process) และปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน (Gasification process)
4. จำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและไบโอแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากกากปาล์ม

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การประเมินค่าเอเมอร์จี การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ และแบบจำลองกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

การวิเคราะห์เอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลจะช่วยแสดงข้อเท็จจริงว่าไบโอดีเซลถือเป็นพลังงานทางเลือกอย่างแท้จริงหรือไม่ และมีความยั่งยืนมากน้อยเพียงใดเมื่อนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และ มีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดในการพัฒนาไบโอดีเซลจากสบู่ดำให้เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้
   - การวิเคราะห์เอเมอร์จีและตัวชี้วัดความยั่งยืนของกระบวนการ
   - กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและสบู่ดำ
   - กระบวนการผลิตเมทานอล
   - กระบวนการผลิตไบโอเอทานอล
2. วางแผนการดำเนินงานและสืบค้นแหล่งเก็บข้อมูลตามกรณีศึกษาซึ่งได้แก่
   - การผลิตไบโอดีเซลในโรงงานต้นแบบจากน้ำมันปาล์มด้วยเมทานอล
   - การผลิตไบโอดีเซลในโรงงานต้นแบบจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเมทานอล
   - การผลิตไบโอดีเซลในโรงงานต้นแบบจากน้ำมันปาล์มด้วยไบโอเอทานอล
   - การผลิตไบโอดีเซลในโรงงานอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มด้วยเมทานอล
   - การผลิตไบโอดีเซลในโรงงานอุตสาหกรรมจากน้ำมันสบู่ดำด้วยเมทานอล
   - การผลิตไบโอดีเซลในโรงงานอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มด้วยไบโอเอทานอล
3. เก็บข้อมูลโดยแบ่งข้อมูลออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่
   - การปลูกและเก็บเกี่ยวปาล์มและสบู่ดำ
   - การสกัดน้ำมันจากพืช
   - กระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งแบ่งออกเป็นกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรมต้นแบบ
   - การใช้เชื้อเพลิงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้เชื้อเพลิง
4. นำข้อมูลมาคำนวณตัวชี้วัดความยั่งยืนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
5. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

บทที่ 2 การประเมินเอเมอร์จี ดัชนีความยั่งยืน กระบวนการผลิตไบโอดีเซล และกระบวนการผลิตไบโอแอลกอฮอล์

บทที่ 3 การคำนวณเอเมอร์จีและการจำลองกระบวนการด้วย โปรแกรม ASPEN PLUS®

บทที่ 4 ผลการ ประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย และผลการประเมินเอเมอร์จีจากข้อมูลการจำลองกระบวนการ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

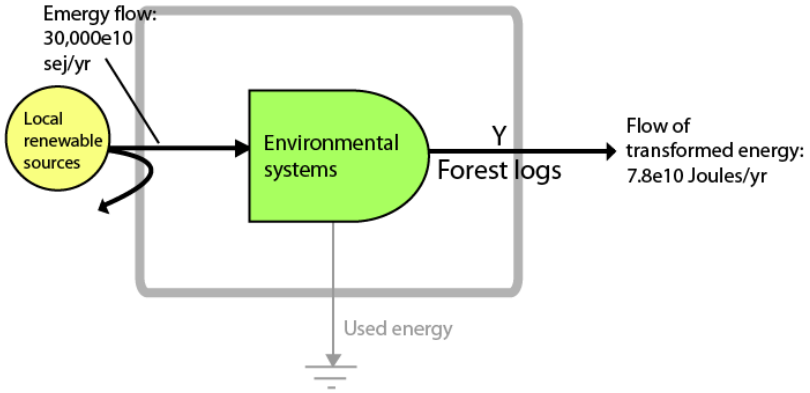
2.1 ความหมายของเอเมอร์จี

ทรัพยากรที่มีอยู่ในโลกอย่างเช่น ท่อนซุง มีพลังงานภายในตัวมันที่สามารถดึงมาใช้ได้ ถ้านำท่อนซุงมาเผาพลังงานเหล่านั้นก็จะถูกปลดปล่อยออกมาและถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานนั้นอาจจะมีหน่วยเป็นแคลอรีหรือจูล

ในทางตรงกันข้าม เอเมอร์จีแสดงถึงพลังงานของสิ่งๆนั้นส่วนที่นำมาจากธรรมชาติ (หรือสูญเสียไประหว่างการเปลี่ยนรูป) ก่อนที่จะกลายมาเป็นท่อนซุง หรือกล่าวได้ว่าเอเมอร์จีนั้นเป็นเสมือน “พลังงานในความทรงจำ” (Energy memory) ของวัตถุชนิดนั้น [2]

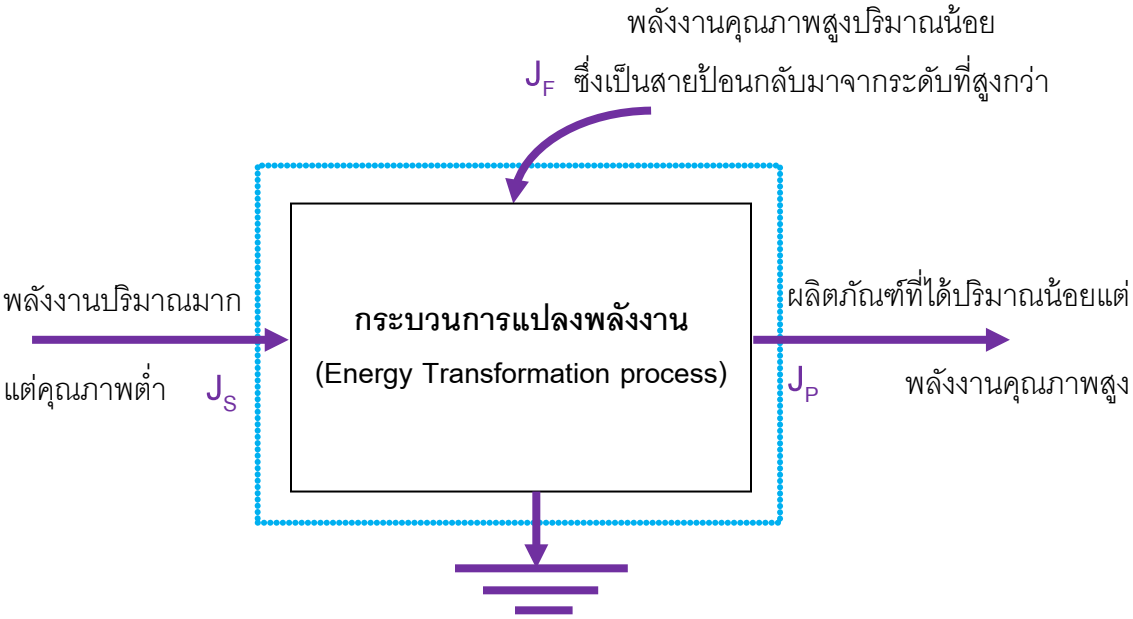
2.2 แนวคิดเกี่ยวกับเอเมอร์จี

ในปี 1985 Howard Odum ได้นิยามความหมายของเอเมอร์จีไว้ว่า “เอเมอร์จีเป็นพลังงานรูปใดรูปหนึ่งที่ใช้ไปทั้งทางตรงหรือทางอ้อมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์นั้นออกมา” [2] ซึ่งในคำนิยามนี้พลังงานแต่ละรูปเช่น พลังงานความร้อน พลังงานกล หรืออื่นๆ มีประสิทธิภาพในการทำงานไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายขึ้นในการเปรียบเทียบจึงมีการเปลี่ยนรูปพลังงานทั้งหมดให้อยู่ในรูปเดียวกัน ซึ่งก็คือ พลังงานแสงอาทิตย์ แทนด้วยหน่วย โซลาร์จูลหรือเทียบเท่าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar emjoule, sej) ยกตัวอย่างเช่น การสร้างป่าสนในประเทศสวีเดนขนาด 7.8×10^{10} J/yr ใช้พลังงานจากธรรมชาติคิดรวมเป็น $30{,}000 \times 10^{10}$ sej/yr [4] แผนผังของระบบนี้แสดงในภาพที่ 2.1 ในบางกรณีมีการใช้หน่วยเงินมาเปลี่ยนรูปพลังงาน เช่น Em$ (เอมดอลลาร์, emdollars) ในงานวิจัยของ Anil Baral และคณะ [3]

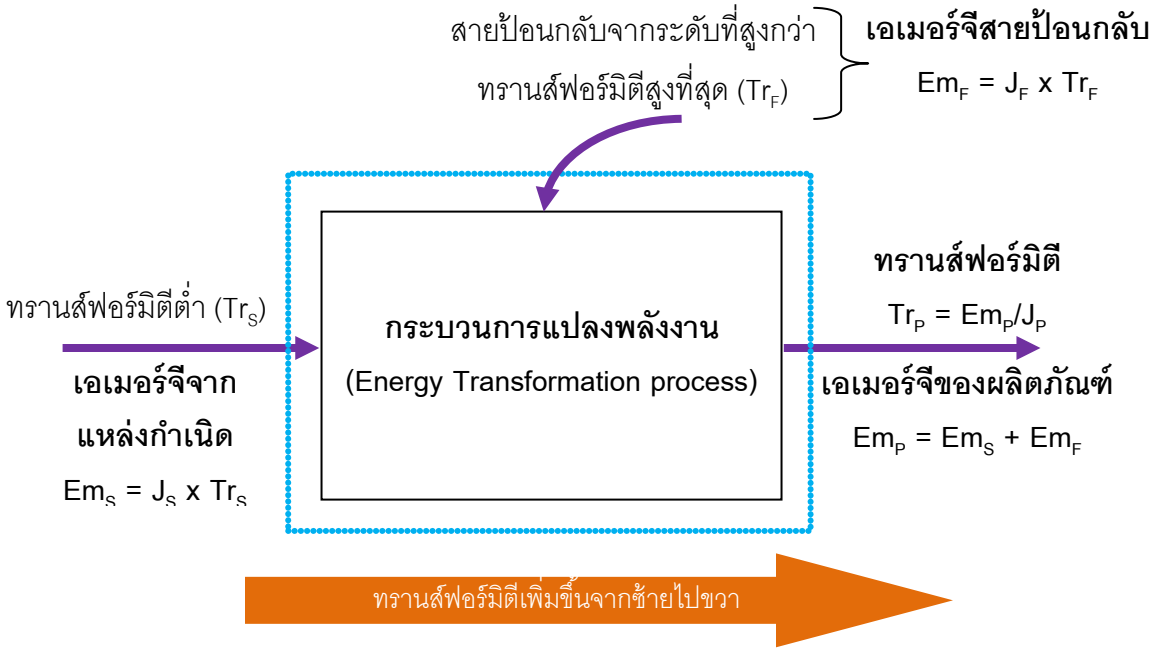


ภาพที่ 2.1 แผนผังกระบวนการเกิดท่อนซุงในป่าสนประเทศสวีเดนในพื้นที่ขนาด 1 เฮคแทร์ [2]

(ก) **แผนผังกระบวนการแปลงพลังงาน** (Energy system diagram of a work process)



(ข) **เอเมอร์จีและทรานส์ฟอร์มิตี**



ภาพที่ 2.2 แผนผังเปรียบเทียบระหว่างระบบพลังงานและระบบเอเมอร์จี ก) แผนผังกระบวนการแปลงพลังงาน ข) เอเมอร์จีและทรานส์ฟอร์มิตี [2]

2.2.1 **ทรานส์ฟอร์มิตี** (Transformity)

นำเอเมอร์จีมาหารด้วยพลังงานของผลิตภัณฑ์ ค่าที่ได้จะเรียกว่าทรานส์ฟอร์มิตี มีความหมายคือเอเมอร์จีทั้งหมดที่ใช้ไปทั้งในทางตรงและทางอ้อมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาหนึ่งหน่วยพลังงานผลิตภัณฑ์นั้น ค่ามากหมายถึงการได้ผลิตภัณฑ์นั้นมา 1 หน่วย ต้องดึงทรัพยากรมาใช้ปริมาณมาก ทรานส์ฟอร์มิตี มีหน่วยเป็น sej/J ตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วคือกรณีป่าสนในประเทศสวีเดนจะมีค่าทรานส์ฟอร์มิตีเท่ากับ 3846 sej/J อธิบายได้ตามภาพที่ 2.1 โดยค่าทรานส์ฟอร์มิตีของท่อนซุงนี้จะคำนวณได้ตามสมการด้านล่าง

$$\text{Transformity of logs} = \frac{\text{Solar emergy flow}}{\text{Energy flow}} = \frac{\text{30,000e10 sej/yr}}{\text{7.8e10 J/yr}} = \text{3486 sej/J}$$

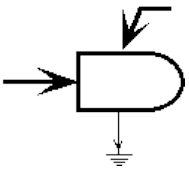
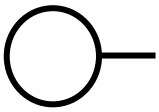
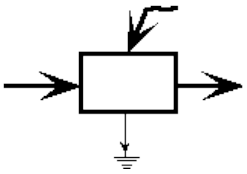
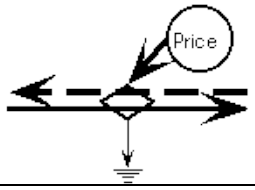
ทรานส์ฟอร์มิตีอาจแสดงอยู่ในอีกภาพที่เรียกว่าเอเมอร์จีจำเพาะ (Specific emergy) ซึ่งเป็นค่าเอเมอร์จีต่อน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็น sej/g เป็นตัวแทนว่าการจะได้ผลิตภัณฑ์มีมวล 1 กรัมต้องใช้เอเมอร์จีปริมาณเท่าไร

2.2.2 **แผนผังเอเมอร์จี**

สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนผังอย่างภาพที่ 2.1 แต่ละชนิดมีความหมายแตกต่างกัน สรุปสัญลักษณ์สำคัญที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 2.1

ภาพที่ 2.1 เป็นแผนผังเอเมอร์จีของระบบอย่างง่าย มีพลังงานป้อนเข้าจากแหล่งเดียวและกระบวนการขั้นตอนเดียว ซึ่งในระบบจริงมีความซับซ้อนกว่านั้นมาก ระบบส่วนใหญ่จะประกอบด้วยส่วนหลัก 4 ส่วน และมีพลังงานที่ป้อนสู่ระบบ 2 แหล่ง

ตารางที่ 2.1 ความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ [2]

สัญลักษณ์	ความหมาย	สัญลักษณ์	ความหมาย
	เส้นทางการไหล (Energy circuit)		หน่วยผลิต (Producer)
	แหล่งทรัพยากรต้นกำเนิดที่ถูกควบคุมจากภายนอกระบบ (Source)		หน่วยของกระบวนการใดๆ (Miscellaneous)
	พลังงานที่สูญเสียไป (Heat sink)		หน่วยแลกเปลี่ยนทางการเงิน(Transaction)

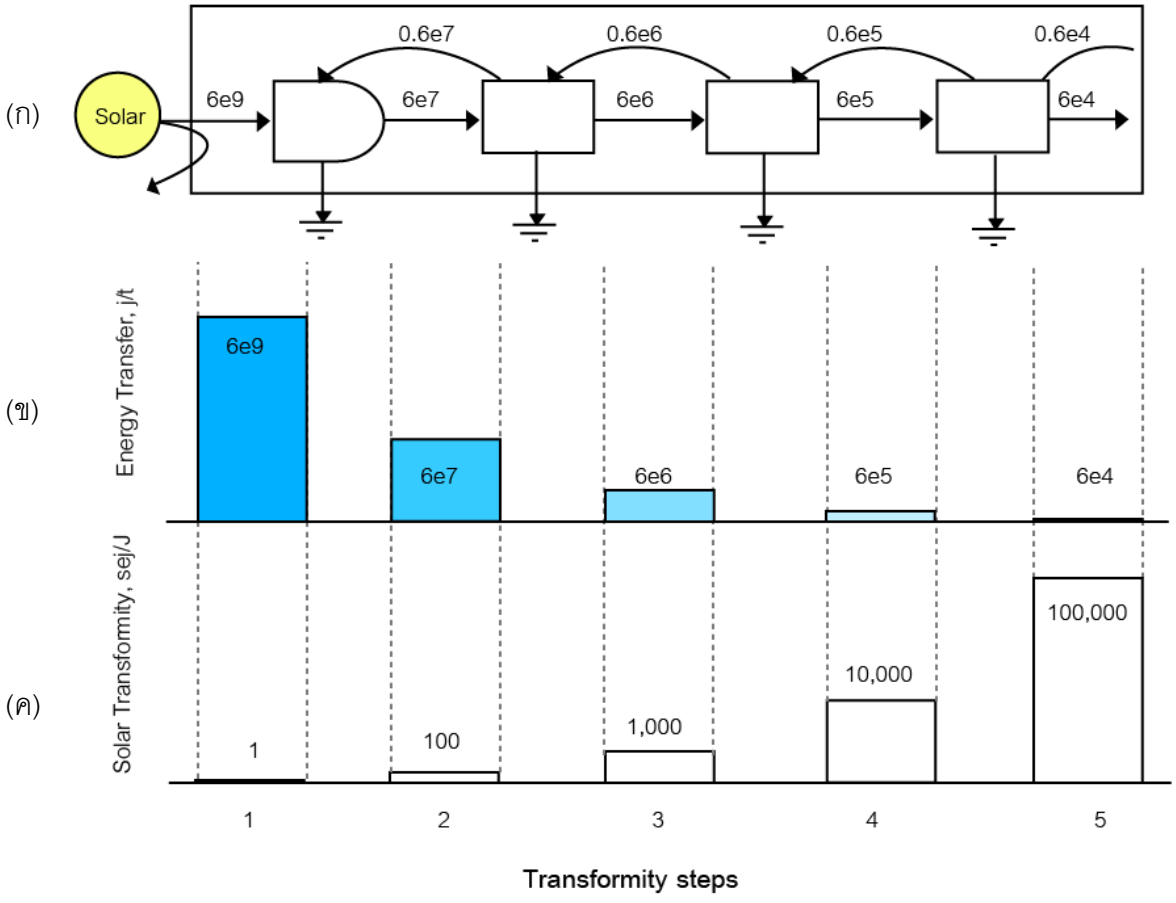
พลังงานที่ป้อนสู่ระบบได้แก่

1. พลังงานที่หมุนเวียนได้ R (Renewable resources)
    - แหล่งพลังงานในระบบ (Local) R_L : แสงอาทิตย์ ฝน
2. พลังงานที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ N (Non-renewable resources)
    - แหล่งพลังงานในระบบ (Local) R_L : อินทรียวัตถุในดิน
    - แหล่งพลังงานที่นำเข้ามาในระบบ (Purchase resources) F : สารเคมีต่างๆ น้ำมันดีเซล ไฟฟ้า เป็นต้น
    - แรงงานและค่าจ้าง (Labor and service) S

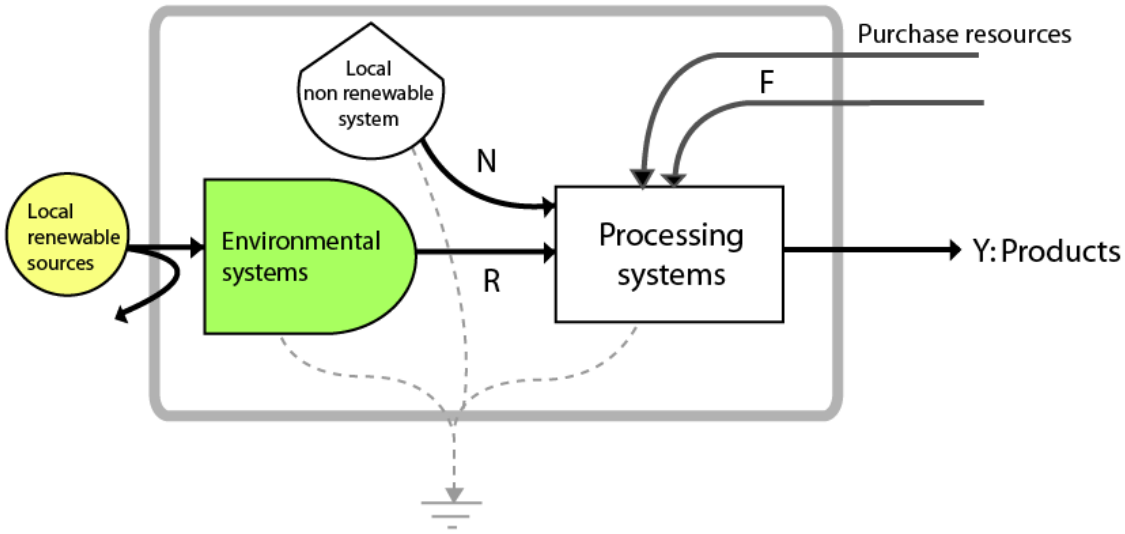
จากตัวอย่างที่กล่าวไปแล้ว ในการสร้างผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งพลังงานจะเข้มข้นขึ้นจากซ้ายไปขวา เริ่มที่ดวงอาทิตย์ซึ่งปล่อยพลังงานออกมา พืชเก็บรวบรวมพลังงานเหล่านั้น หลังจากนั้นพืชที่ถูกแปรรูปก็จะเก็บรวบรวมพลังงานที่ป้อนเข้ามาอีกที ตามที่แสดงในภาพที่ 2.3

2.2.3 ตัวชี้วัดความยั่งยืน

ในการคำนวณดัชนีต่างๆนั้น ระบบเอเมอร์จีจัดกระแสเอเมอร์จีออกเป็นสายหลักสามสาย (ได้แก่ สายทรัพยากรในระบบ สายทรัพยากรที่นำเข้ามาในระบบ และสายขาออกของผลิตภัณฑ์) ในภาพที่ 2.4 มีสายทรัพยากรในระบบสองสาย (ส่วนที่หมุนเวียนได้ (R) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานฝน และส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ (N) เช่น อินทรียวัตถุในดิน) สายทรัพยากรที่นำเข้ามาในระบบ (F) (ส่วนที่ซื้อเข้ามา เช่น โลหะ สารเคมี น้ำมันดีเซล และส่วนที่เป็นแรงงานคน หรือค่าจ้างต่างๆ) และสายขาออกของผลิตภัณฑ์ (Y)



ภาพที่ 2.3 ลำดับการเปลี่ยนรูปพลังงาน (ก) แผนผังการกระจายพลังงานในแต่ละส่วน (ข) กราฟแท่งของพลังงานในแต่ละขั้น (ค) กราฟแท่งของทรานส์ฟอร์มิตีในแต่ละขั้น [2]



ภาพที่ 2.4 แผนผังสรุปเอเมอร์จีในระบบทั่วไป [2]

ดัชนีที่ใช้ในการประเมินเอเมอร์จีมีอยู่ 6 ตัวหลัก ได้แก่

1. เอเมอร์จีทั้งระบบ $Y = R + N + F$
2. ทรานส์ฟอร์มิตี เป็นค่าที่แสดงว่าการจะได้ผลิตภัณฑ์ 1 หน่วยพลังงานจำเป็นต้องป้อนเอเมอร์จีเข้ามาเท่าไหร่ คำนวณจาก

$$\text{ทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์} = \frac{\text{เอเมอร์จีทั้งระบบ (Y)}}{\text{พลังงานของผลิตภัณฑ์}}$$

3. ร้อยละส่วนที่หมุนเวียนได้ $PR = R / (R + N + F)$
4. สัดส่วนภาระต่อสิ่งแวดล้อม $ELR = (N + F) / R$
5. สัดส่วนเอเมอร์จีที่ได้ $EYR = Y / F$
6. ดัชนีความยั่งยืน $ESI = EYR / ELR$

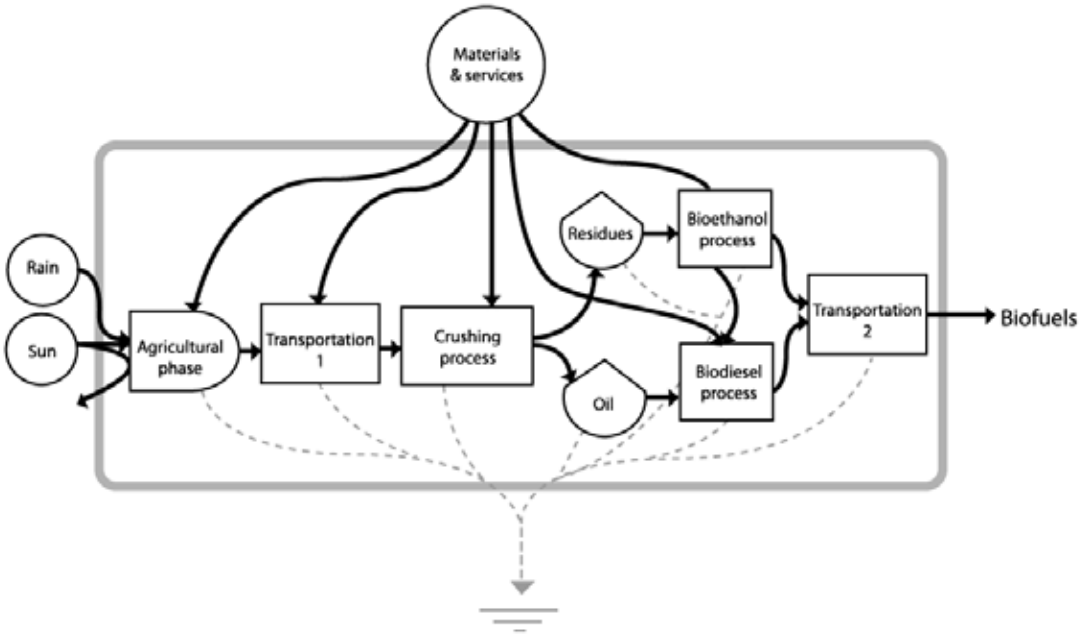
โดยความหมายและขั้นตอนการคำนวณอย่างละเอียดจะอธิบายไว้ในบทที่ 3 ส่วนที่ 3.2

2.2.4 ขั้นตอนการประเมินเอเมอร์จี

การประเมินเอเมอร์จีโดยทั่วไปมีสองขั้นตอน ขั้นแรกรวบรวมสายป้อนเข้าระบบแล้วเปลี่ยนให้เป็นเอเมอร์จีด้วยค่าทรานส์ฟอร์มิตี ขั้นที่สองคำนวณตัวชี้วัดความยั่งยืนซึ่งใช้อธิบายสมบัติต่างๆของระบบ เช่น ผลได้ การกระจายผลกระทบไปยังสิ่งแวดล้อม ความยั่งยืน เป็นต้น โดยในขั้นตอนแรกจำเป็นจะต้องรู้แหล่งต้นกำเนิดพลังงานของแต่ละสายว่าเป็นทรัพยากรหมุนเวียน (R) หรือทรัพยากรไม่หมุนเวียน (N) เป็นสัดส่วนอย่างไร ภาพที่ 2.5 แสดงแผนผังเอเมอร์จีของระบบการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้หลักการเขียนแผนภูมิตามวิธีของ Odum [2] แผนผังจะแสดงขอบเขตของระบบซึ่งมีการแสดงสายป้อนเข้าและสายที่เกี่ยวข้องกับระบบ รวมถึงขั้นตอนแต่ละขั้นตอนกว่าจะได้มาเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ

กระบวนการในระบบได้แก่

1. ขั้นการปลูก
2. ขั้นการหีบน้ำมัน
3. ขั้นการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพ
4. ขั้นการขนส่ง



ภาพที่ 2.5 แผนผังเอเมอร์จีของระบบผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ [2]

จากแผนผังของระบบจะทำให้ทราบถึงสายที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นำค่าเหล่านั้นมาคำนวณในขั้นตอนที่หนึ่ง ซึ่งข้อมูลปริมาณสายขาเข้า ขาออก และค่าทรานส์ฟอร์มิตีได้จากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว หน่วยของสายขาเข้าซึ่งได้แก่ หน่วยพลังงานจูล (Joule) หน่วยมวล (gram) หรือหน่วยเงินดอลล่าร์สหรัฐ ($) จะถูกเปลี่ยนเป็นเอเมอร์จีด้วยค่าทรานส์ฟอร์มิตีที่เหมาะสมตามสมการด้านล่าง [4]

$$\text{Energy transformation (ETR)} = \frac{\text{Solar emergy (sej)}}{\text{Energy (J)}} \qquad (2.1)$$

$$\text{Mass transformation (MTR)} = \frac{\text{Solar emergy (sej)}}{\text{Mass (gram)}} \qquad (2.2)$$

$$\text{Money transformation (DTR)} = \frac{\text{Solar emergy (sej)}}{\text{Money (\$)}} \qquad (2.3)$$

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการคำนวณเอเมอร์จีของสายป้อนเข้า [2]

ลำดับ	สาย	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี (sej/unit)	เอเมอร์จี (sej/yr)
1	พลังงาน	e_i	J	ETR_i	$ETR_i \times e_i$
2	มวล	m_j	g	MTR_j	$MTR_j \times m_j$
3	ค่าจ้างต่างๆ	d_k	$	DTR_k	$DTR_k \times d_k$
รวม					TEm

ตารางที่ 2.2 ใช้ในการคำนวณสายป้อนเข้าแต่ละหน่วยที่แตกต่างกัน โดยแสดงให้เห็นถึงวิธีจัดการกับสายป้อนเข้าแต่ละรูปแบบทั้ง พลังงาน มวล หรือเงิน และเปลี่ยนให้เป็นปริมาณเอเมอร์จีแสงอาทิตย์ซึ่งมีหน่วยเป็น solar emjoules (sej) และผลรวมของเอเมอร์จีทั้งหมดที่ป้อนให้กับระบบคือเอเมอร์จีรวม (TEm: Total emergy) ซึ่งหาได้จาก

$$TEm = \sum_{i=1}^{n} ETR_i \cdot e_i + \sum_{j=1}^{n} MTR_j \cdot m_j + \sum_{k=1}^{n} DTR_k \cdot d_k \qquad (2.4)$$

โดยที่ e_i คือปริมาณพลังงานในสาย i m_j คือปริมาณมวลในสาย j และ d_k คือปริมาณเงินในสาย k

หลังจากได้ปริมาณเอเมอร์จีแต่ละสายแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนที่สองคือการคำนวณตัวชี้วัดความยั่งยืน โดยเริ่มจากการจัดกลุ่มเอเมอร์จีทั้งหมดออกเป็นสองกลุ่มหลักคือ กลุ่มที่ได้จากธรรมชาติ (I) และกลุ่มที่ซื้อเข้ามา (F) โดยกลุ่มที่ได้จากธรรมชาติจะแบ่งออกเป็นส่วนที่หมุนเวียนได้ (R) และส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ (N) กลุ่มที่ซื้อเข้ามาแบ่งออกเป็นส่วนที่ต้องจ่ายให้เป็นค่าจ้างแรงงาน (S) และส่วนที่ต้องจ่ายเป็นค่าวัสดุต่างๆ (M) เช่น ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง หรือเชื้อเพลิง

สัดส่วนเอเมอร์จีที่ได้หรือ Emergy Yied Ratio (EYR) เป็นค่าที่วัดเอเมอร์จีที่ได้เทียบกับเอเมอร์จีสายป้อนเข้าที่ได้จากทรัพยากรที่จัดซื้อมา (F) EYR จึงคล้ายคลึงกับค่าผลตอบแทนเชิงพลังงานต่อพลังงานที่ลงทุนไว้ในภาคธุรกิจหรือ Energy Return on Investment ย่อด้วย EROI ของ Hall [5] แต่ EYR นี้จะรวมส่วนที่เข้ามาจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ดิน น้ำ เป็นต้น) และส่วนที่เป็นค่าจ้างหรือบริการจากแรงงานคนที่ มาจากเศรษฐ ศาสตร์ ดัชนีทั้งสอง นี้เป็นอัตราส่วน ระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อส่วนที่ป้อนเข้าทั้งหมด

ตัวชี้วัดถัดมาคือสัดส่วนภาระของสิ่งแวดล้อมหรือ Environmental Loading Ratio (ELR) เป็นตัวบอกปริมาณภาระของสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากแหล่งพลังงานไม่หมุนเวียนที่อยู่ในระบบ ยิ่ง ELR มากแสดงว่าระบบสร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากระบบต้องการทรัพยากรจากสิ่งแวดล้อมส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อเนื่องไปยังระบบนิเวศโดยรอบได้ ส่วนตัวชี้วัดที่บอกปริมาณทรัพยากรหมุนเวียนที่ใช้ในระบบคือร้อยละส่วนที่หมุนเวียนได้ (Percent Renewable หรือ %R) ซึ่ง ELR และ %Renewable นั้นมีความสัมพันธ์กันอยู่ โดย %R = 1 / (1 + ELR) ซึ่งแปลว่าหาก %R เพิ่ม ELR ก็จะลดตามความสัมพันธ์ในสมการ

ตัวชี้วัดตัวสุดท้ายที่สำคัญที่สุดคือดัชนีความยั่งยืนหรือ Emergy Sustainability Index (ESI) เป็นอัตราส่วนระหว่าง EYR ต่อ ELR โดยใช้อธิบายว่าผลที่ได้ของระบบเทียบกับภาระต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างไร ค่า ESI มากแสดงถึงผลได้ของระบบมาก และสร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อมน้อย โดยที่เมื่อ ESI เป็น 1 หมายถึงผลได้ของระบบมีความสมดุลกับภาระที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม ค่าที่ต่ำกว่า 1

แปลว่าระบบยังไม่ยั่งยืนเพียงพอ เนื่องจากภาระต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นสูงกว่าผลได้ ซึ่งเหมือนกับเป็นการขาดดุล

2.3 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลคือน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตมาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยผ่าน กระบวนการที่ทำให้โมเลกุลเล็กลง ให้อยู่ในรูปของ เอทิลเอสเทอร์ (Ethyl esters) หรือ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters) ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยตรง

2.3.1 ศักยภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย

ในประเทศไทย กลุ่มที่ มีความต้องการ น้ำมันดีเซลเป็นจำนวนมากคือ กลุ่มขนส่ง โดยเฉพาะรถยนต์บรรทุกขนาดใหญ่ ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นหลัก และกลุ่มเกษตรกร เนื่องจาก เครื่องยนต์ทางการเกษตรเป็นเครื่องยนต์ที่ต้องใช้น้ำมันดีเซล ทั้งสองกลุ่มนี้ถือว่ามีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ โดยข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในประเทศไทย รายงานว่าปริมาณการผลิตไบโอดีเซลในปี 2550 เฉลี่ยอยู่ที่ 0.32 ล้านลิตรต่อวัน และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเป็น 14.7 ล้านลิตรต่อวันในปี 2551 ซึ่งสูงขึ้นถึง 45 เท่าใน 1 ปีและเพิ่มอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2554 มีปริมาณการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 20.5 ล้านลิตรต่อวัน

ปัจจุบันมีสถานีบริการน้ำมันไบโอดีเซลบี 5 รวมทั้งสิ้น 1,051 สถานี มีบริษัทผู้ค้าน้ำมันไบโอดีเซลบี 5 จำนวน 8 บริษัท ได้แก่ ปตท. บางจาก เชลล์รีเทล (คอนอคโค) ทรานเทคเอ็น เอสโซ่ เชฟรอน และยูนิแก๊ส

(ก) (ข)

ภาพที่ 2.6 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ก) เมล็ดสบู่ดำ ข) เมล็ดปาล์ม

2.3.2 ชีวมวลที่นำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นคำเรียกกว้าง ๆ ของเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล คำนี้รวมถึงชีวมวลแข็ง ชีวมวลเหลว และก๊าซชีวภาพหลายชนิด

เนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นและความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงชีวภาพกำลังเป็นที่สนใจ ที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้น ประเด็นหลักคือ เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถสร้างขึ้นได้หรือเรียกว่าเป็นพลังงานที่หมุนเวียนได้ ในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นมีแต่จะหมดไป

ตารางที่ 2.3 แสดงเชื้อเพลิง แหล่งชีวมวลที่ใช้ผลิต และกระบวนการผลิตของเชื้อเพลิงชีวภาพแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าชีวมวลแต่ละชนิดมีความจำเพาะต่อเชื้อเพลิงบางชนิด เนื่องจากองค์ประกอบหลักในชีวมวลนั้นแตกต่างกัน บางตัวมีปริมาณสารระเหยง่าย (Volatile matter) มากก็เหมาะจะใช้ผลิตไบโอดีเซล เช่น สาหร่าย ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ เป็นต้น ส่วนบางตัวมีลิกโนเซลลูโลสมากก็เหมาะจะใช้ผลิตไบโอแอลกอฮอล์ หรือบางตัวสามารถใช้ผลิตได้ทั้งไบโอดีเซลและไบโอแอลกอฮอล์โดยตัวน้ำมันนำมาผลิตไบโอดีเซล ส่วนกากที่เหลือหลังจากการหีบน้ำมันก็นำมาผลิตไบโอแอลกอฮอล์ หรือผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันได้เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรเจน [6]

ตารางที่ 2.3 เชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลต่างๆ

เชื้อเพลิง	ชีวมวล	กระบวนการผลิต
เอทานอล เมทานอล	แกลบ กะลามะพร้าว ซังข้าวโพด อ้อย ฯลฯ	การหมัก แกซิฟิเคชัน ฟิชเชอร์ทรอปช์
ไฮโดรเจน	หญ้าสวิตช์แกรส (switchgrass) ฯลฯ	แกซิฟิเคชัน
ไบโอดีเซล	สาหร่าย ปาล์มน้ำมัน ถั่วเหลือง ฯลฯ	ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

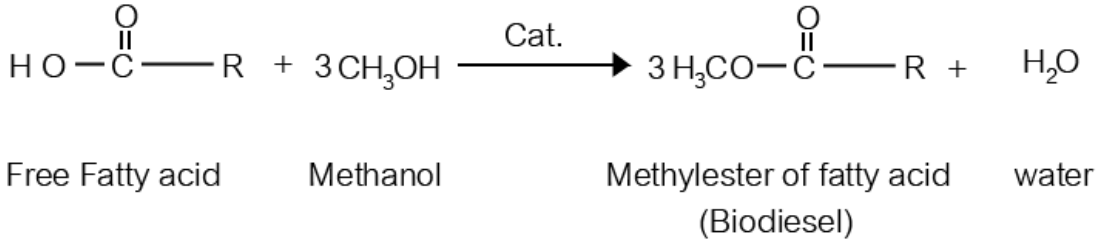
ไบโอแก๊ส	มันสำปะหลัง กากชีวมวลอื่นๆ ฯลฯ	การหมัก

2.3.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล [7]

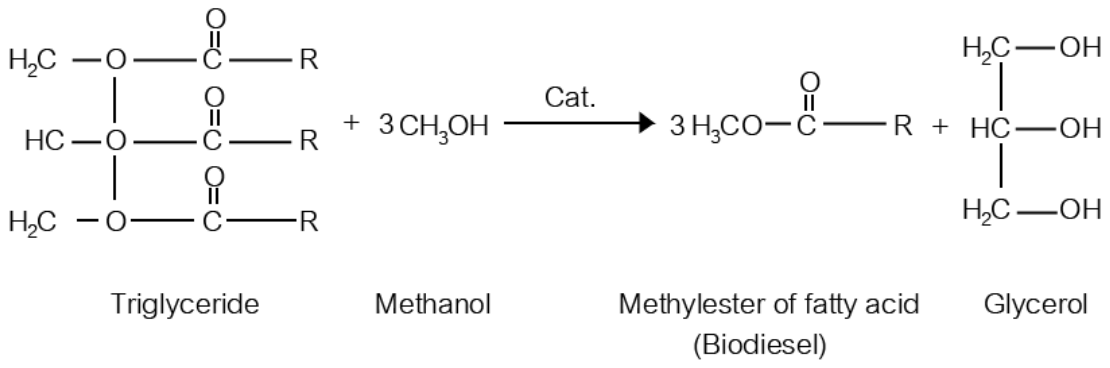
ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนจากน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล มีชื่อทางเคมี ว่า เอสเทอร์ (Ester) โดยการเรียกชื่อจะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลเอ สเทอร์ (เมื่อใช้เมทิลแอกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา) เป็นต้น

ปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารเอสเทอร์ มี 2 กระบวนการด้วยกัน ได้แก่

1. เอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และน้ำ
2. ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

กระบว นการทางเคมี ที่นิยมใช้ เปลี่ยน น้ำมันพืช ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์กับ แอลกอฮอล์ โดยกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของไต รกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl ester) หรือเมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester)

การเรียกชื่อ ขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เมทานอลเป็นสาร ตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา หรือ เอทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เอทานอล เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ *[7]*

ไบโอดีเซลจากน้ำมัน	ความถ่วงจำเพาะ (g/ml)	จุดวาบไฟ (^{o}C)	ค่าซีเทน	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ปาล์ม	0.887	167	62-65	39,300
เมล็ดเรพ	0.883	>170	58	37,100
ถั่วเหลือง	n.a.	n.a.	51-53	n.a.
ทานตะวัน	n.a.	n.a.	52	n.a.
น้ำมันดีเซล	0.81-0.87	>52	>47	46,800

2.4 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

2.4.1 การปลูก (Agricultural phase) ปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่มีการปลูกบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ปลูกมากกว่าร้อยละ 70 ของพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั้งหมด [8] จังหวัดที่มีการปลูกมากที่สุดสามจังหวัด ได้แก่ กระบี่ ชุมพร และสุราษฎร์ธานี ปริมาณน้ำที่ใช้ในการดูแลปาล์มส่วนใหญ่ได้จากน้ำฝนตลอดอายุปาล์มทั้ง 25 ปี [9]

ปาล์มน้ำมันจะเริ่มออกผลที่อายุ 2½ ถึง 3 ปีหลังการปลูก โดยทั่วไปจะมีช่วงการเก็บเกี่ยวอยู่ระหว่าง 10 ถึง 15 วันหรือ 2 ถึง 3 ครั้งต่อเดือน น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการหีบน้ำมันอยู่ระหว่าง 16 ถึงร้อยละ 17 โดยมวล ความหนาแน่นของการปลูกคือ 21 ถึง 22 ต้นต่อไร่ (1 เฮคแทร์เท่ากับ 6.25 ไร่) และได้ผลปาล์มสด (Fresh fruit bunch หรือ FFB) ปริมาณ 2.7 ถึง 2.8 ตันต่อไร่ต่อปีหรือประมาณ 17 ตันต่อเฮคแทร์ต่อปี[10] ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวส่วนใหญ่จะใช้แรงงานคน อย่างปาล์มที่อายุน้อยจะใช้สิ่ว ส่วนปาล์มที่อายุมากและลำต้นสูงยาวจะใช้เคียวด้ามยาวในการเก็บเกี่ยว บางส่วนจะใช้เครื่องมือและรถบรรทุกซึ่งจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการขับเคลื่อน

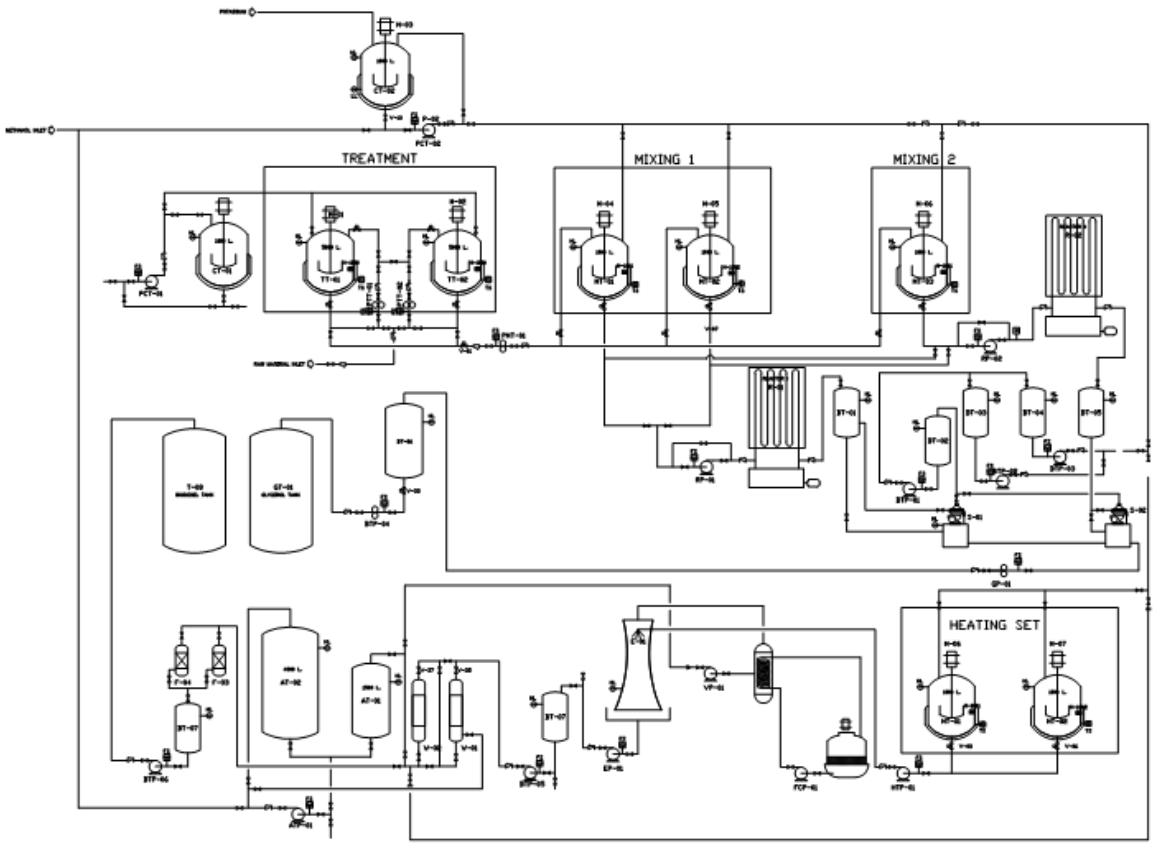
2.4.2 การใส่ปุ๋ยและยาฆ่าแมลง ปุ๋ยที่ใช้ในแต่ละปีคือ ปุ๋ยไนโตรเจน 7.79 กิโลกรัม ต่อตันของผลปาล์มสด ปุ๋ยฟอสฟอรัส 0.05 ตันต่อตันของผลปาล์มสด และปุ๋ยโพแทสเซียม 14.41 กิโลกรัมต่อตันของผลปาล์มสด ซึ่งหากใช้กากเหลือจากกระบวนการ เช่น ซังปาล์ม มาใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพจะสามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงได้สูง โดยสามารถทดแทนปุ๋ยไนโตรเจนได้ร้อยละ 9.5 [10] ปุ๋ยฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 5.6 [10] และปุ๋ยโพแทสเซียมร้อยละ 75.4 [10] สารเคมีที่ใช้กำจัดวัชพืชได้แก่ ไกลโฟเสต (glyphosate) และพาราควอต (paraquat) ใช้ 1-3 ครั้งต่อปี โดยใช้ไกลโฟเสตในปริมาณครั้งละ 0.3-0.5 กิโลกรัมต่อไร่ (หรือ 0.28 กิโลกรัม ต่อตันของ ผลปาล์มสด) และพาราควอตครั้งละ 0.1-0.2 กิโลกรัมต่อไร่ (หรือ 0.10 กิโลกรัม ต่อตันของผลปาล์มสด) พลังงานเทียบเท่าเชื้อเพลิงฟอสซิล [11] ของปุ๋ยไนโตรเจนมีค่า 57.47 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีค่า 7.04 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ปุ๋ยโพแทสเซียมมีค่า 6.85 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ ไกลโฟเสตเป็น 266.56 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (สมมุติว่ามีค่าเท่ากับพาราควอต)

2.4.3 การหว่านเมล็ด เมล็ดปาล์มที่ใช้ในการปลูกมีปริมาณ 168 กิโลกรัมต่อเฮคแทร์ [12] พลังงานเมล็ดปาล์มมีค่า 0.99 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [13]

2.4.4 การผลิตน้ำมันปาล์ม จากงานวิจัยของ Chavalparit [14] ซึ่งเก็บข้อมูลจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบกำลังการผลิต 1000 ตันของผลปาล์มสดต่อวัน น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil หรือ CPO) ที่ผลิตได้มีปริมาณ 178 ตันต่อวัน ในกระบวนการจะใช้น้ำ 1,260 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ไฟฟ้า 17.11 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันของผลปาล์มสด และน้ำมันดีเซล 0.024 ลิตรต่อตันของผลปาล์มสด ข้อมูลสรุปแสดงดังตารางที่ 3.1

2.4.5 การขนส่ง ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงข้อมูลมาจากงานวิจัยที่เก็บข้อมูลในแหล่งปลูกปาล์มบริเวณจังหวัดกระบี่ในภาคใต้ของประเทศไทย โดยโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มอยู่ติดกับแหล่งปลูก พื้นที่ปลูกโดยประมาณใช้ในการคำนวณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในการขนส่งผลปาล์มสดไปยังโรงงานผลิตน้ำมันให้ทันภายใน 24 ชั่วโมงเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ผลปาล์มที่สดมาก ปริมาณน้ำมันที่ได้จะยิ่งสูง [15] และยังสมมุติให้โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm oil refinery) อยู่ใกล้กับโรงงานผลิตน้ำมันดิบ ส่วนโรงงานผลิตไบโอดีเซลให้อยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ภาคกลางของประเทศไทย รถบรรทุกมีความจุ 3 ตัน ขนส่งผลปาล์มสดจากแหล่งผลิตไปยังโรงงานผลิตน้ำมันระยะทางประมาณ 56 กิโลเมตรต่อรอบ [10] และใช้รถบรรทุกความจุ 20 ตันขนส่งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มไปยังโรงงานผลิตไบโอดีเซลระยะทาง 1628 กิโลเมตรต่อรอบ [10] จากนั้นรถบรรทุกขนาด 20 ตันจะขนส่งปาล์มเมทิลเอสเทอร์จากโรงงานผลิตไปยังแหล่งขายระยะทาง 48 กิโลเมตรต่อรอบ [10]

2.4.6 พลังงานของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการหีบน้ำมันจากผลปาล์มสด 1 ตัน ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า 230 กิโลกรัม เส้นใย 140 กิโลกรัม เปลือก 55 กิโลกรัม กากปาล์ม 32 กิโลกรัม และเถ้า 50 กิโลกรัม [10]



ภาพที่ 2.9 แผนผังระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ [ที่มา: กรมอู่ทหารเรือ]

ในส่วนถัดไปสมมุติว่าระบบขนาดต้นแบบและระบบขนาดอุตสาหกรรมใช้น้ำมันที่มีขั้นการปลูกและการผลิตน้ำมันปาล์มจากแหล่งเดียวกัน ดังนั้นข้อมูลสองส่วนนี้จะถือว่าเท่ากัน

2.5 การผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันขนาดต้นแบบ

2.5.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในระบบต้นแบบ ข้อมูลส่วนนี้ได้จากกรมอู่ทหารเรือซึ่งมีการพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาเป็นระยะเวลานาน โดยโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีกำลังการผลิต 20,000 ลิตรต่อวัน สารตั้งต้นคือน้ำมันปาล์ม เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในแต่ละแบตช์เท่ากับ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มทำให้ได้ปาล์มเมทิลเอสเทอร์ (Palm methyl ester หรือ PME) และกลีเซอรอล ของผสมทั้งสองสามารถแยกด้วยการใช้แรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งจะแยกเอสเทอร์ออกจากกลีเซ

อรอลหลังจากนั้นจะนำมาล้างด้วยเรซินปริมาณต่อกิโลกรัมไบโอดีเซล ข้อมูลของกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของระบบขนาดต้นแบบมีดังนี้ 1) ปริมาณเมทานอล 4,000 ลิตรต่อวัน 2) หลังเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะได้ไบโอดีเซลร้อยละ 95 โดยมวลของปริมาณน้ำมันปาล์มที่เป็นสารตั้งต้น 3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 20 กิโลกรัมต่อวัน 4) แรงงานวันละ 250 บาท วันละ 2 คน 5) ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 950,150 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน 6) พลังงานที่ใช้ผลิตเมทานอลคิดเป็น 30.29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [16]

ตารางที่ 2.5 สรุปต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ [ข้อมูลจาก: กรมอู่ทหารเรือ]

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณ (ต่อกิโลกรัมไบโอดีเซล)
1	น้ำมันปาล์ม	กิโลกรัม	1.05
2	ไฟฟ้า[ก]	จูล	1.88×10^5
3	เรซิน 54 กิโลกรัมต่อวัน (กิโลกรัมละ 420 บาท)	บาท	1.36
4	เมทานอล ใช้วันละ 4,000 ลิตร (ลิตรละ 18 บาท)	กิโลกรัม	0.17
5	KOH ใช้วันละ 20 กิโลกรัม (กิโลกรัมละ 40 บาท)	กิโลกรัม	0.00184
6	ค่าแรงงาน (อัตราขั้นต่ำวันละ 250 บาท) 2 คน	บาท	0.044

[ก]รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบแสดงในตาราง ก.1 ภาคผนวก ก

2.6 การผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันขนาดอุตสาหกรรม

2.6.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในระบบอุตสาหกรรม ข้อมูลส่วนนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Gonsalves [17] โดยโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีกำลังการผลิต 330,000 ลิตรต่อวัน สารตั้งต้นคือน้ำมันปาล์ม เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือปาล์มเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ข้อมูลของกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในระบบอุตสาหกรรมนี้แสดงในตาราง 2.6

ตารางที่ 2.6 สรุปต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม [17]

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณ (หน่วยต่อลิตรไบโอดีเซล)

1	น้ำมันปาล์ม	กิโลกรัม	0.9
2	เมทานอล	กิโลกรัม	0.097
3	ตัวเร่งปฏิกิริยา	กิโลกรัม	0.001
4	ไฟฟ้า	กิโลวัตต์ชม.	0.026
5	ไอน้ำ	ลบ.ม.	0.68
6	น้ำหล่อเย็น	ลบ.ม.	0.004
7	น้ำมันเตา	ลิตร	0.038
8	ค่าจ้างแรงงาน	บาท	0.848
9	ค่าบำรุงรักษา (2.5% ของต้นทุนโรงงาน)	บาท	0.139
10	ค่าประกัน (1% ของต้นทุนโรงงาน)	บาท	0.056
11	ค่าเสื่อมราคา (16% ของต้นทุนโรงงาน)	บาท	0.901
12	อื่นๆ	บาท	0.628

2.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

2.7.1 การปลูก (Agricultural phase) สบู่ดำขึ้นชื่อว่าเป็นพืชที่มีความทนทานต่อพื้นที่แห้งแล้ง ความหนาแน่นของการปลูกอยู่ในช่วง 1100 ถึง 3300 ต้นต่อเฮคแทร์ [18] ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในแต่ละปีเท่ากับ 625 กิโลกรัมต่อเฮคแทร์ต่อปี ซึ่งมีอัตราส่วนปุ๋ยไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อโพแทสเซียมเป็น15:15:15 [18] ใช้ไกลโฟเสต (glyphosate) ความเข้มข้นร้อยละ 48 โดยมวลต่อปริมาตร และพาราควอต (paraquat) ร้อยละ 26 โดยมวลต่อปริมาตรสำหรับกำจัดวัชพืชในปริมาณ 3 ลิตรและ 2 ลิตรต่อเฮคแทร์ต่อปีตามลำดับ [18]

2.7.2 การผลิตน้ำมันสบู่ดำ หลังจากที่นำผลสบู่ดำไปตากแห้ง ผลสบู่ดำที่แห้งแล้วจะนำไปหีบน้ำมันด้วยการแตก หีบ และกรอง เครื่องมือที่ใช้มีกำลัง 2 แรงม้าแตกเมล็ดสบู่ดำ 100 ถึง 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เครื่องหีบน้ำมันกำลัง 5 แรงม้าได้น้ำมัน 12.5 ถึง 20 ลิตรต่อชั่วโมง และเครื่องกรอง

2 แรงม้า ได้น้ำมัน 150 ถึง 170 ลิตร (หรือ 138 ถึง 156.4 กิโลกรัม) ต่อชั่วโมง (ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันสบู่ดำที่ได้มีค่า 0.92) [18]

2.7.3 **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ** น้ำมันสบู่ดำที่ได้สามารถนำไปเติมเครื่องยนต์ที่ใช้ในเกษตรกรรมได้ทันที แต่หากใช้โดยไม่เปลี่ยนให้เป็นไบโอดีเซลเสียก่อนอาจจะทำให้เกิดปัญหาในระยะยาวได้ [19] เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซลจากสบู่ดำอ้างอิงจากเครื่องผลิตไบโอดีเซลของกรมอู่ทหารเรือซึ่งได้กล่าวไปแล้วในส่วนของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม แต่สบู่ดำมีองค์ประกอบต่างจากปาล์มน้ำมันเล็กน้อย จึงทำให้อัตราส่วนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ใช้ต่างจากน้ำมันปาล์ม ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่ใช้มีปริมาณร้อยละ 23 โดยปริมาตรต่อปริมาตรสารตั้งต้นทั้งหมด ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ปริมาณร้อยละ 0.7 ถึง 0.9 โดยมวลต่อปริมาตรของสารตั้งต้นทั้งหมด และมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณร้อยละ 95 ถึง 97.5 โดยมวลของสารตั้งต้น (น้ำมันสบู่ดำ) [18]

2.7.4 **การขนส่ง** เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบระบบสบู่ดำและระบบปาล์มน้ำมัน งานวิจัยนี้จึงมีสมมุติฐานให้ปาล์มน้ำมันและสบู่ดำมีแหล่งปลูกและโรงงานผลิตไบโอดีเซลอยู่ในบริเวณเดียวกัน ทำให้การขนส่งของสองระบบนี้เหมือนกัน

ข้อได้เปรียบจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซล

1. การใช้งานปลอดภัยกว่าน้ำมันดีเซลเพราะ จุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลอยู่ที่ประมาณ 69 องศาเซลเซียส ในขณะที่จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลสูงกว่าคือประมาณ 150 องศาเซลเซียส
2. ไม่มีกำมะถันจึงไม่ก่อให้เกิดสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เหมือนน้ำมันดีเซล
3. ลดมลภาวะจากคาร์บอนมอนอกไซด์
4. ลดควันดำได้ถึงร้อยละ 75 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล
5. มีกลิ่นสะอาดไม่เป็นอันตรายเพราะผลิตจากไขมันพืชและสัตว์
6. มีค่าซีเทน (Cetane Index) สูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งทำให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่าย และเดินเรียบกว่า
7. ลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมทำให้ประหยัดเงินตราไว้ในประเทศ

8. ช่วยส่งเสริมรายได้ให้แก่ภาคเกษตรกร

2.8 ไบโอเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ในทางเคมีเป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_5OH ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีน้ำหนักโมเลกุล 46.07 จุดเดือดประมาณ 78 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟง่าย ให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ไม่มีควัน สามารถละลายได้ทั้งในน้ำและสารละลาย อินทรีย์อื่น ๆ ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล เช่น มันสำปะหลัง อ้อย กากน้ำตาล ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน ฯลฯ เป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถนำมาบริโภคได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรูปเอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (เข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร)

ประเทศที่ผลิตเอทานอลมากที่สุดของโลก ได้แก่ บราซิล และสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นประเทศที่ประสบความสำเร็จในการมุ่งมั่นผลักดันให้มีการใช้เอทานอลสำหรับยานพาหนะอย่างจริงจัง ส่วนประเทศในแถบเอเชีย เช่น จีน อินเดีย ก็ เริ่มเข้ามามีบทบาทในการใช้พลังงานทดแทนโดยเฉพาะเอทานอล และ ในปัจจุบันอินเดียได้ เริ่มส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์เพื่อใช้ภายในประเทศและส่งออกไปยังประเทศต่างๆ

เอทานอลผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรซึ่งได้แก่

1. **น้ำตาล** ได้แก่ น้ำอ้อย น้ำตาลจากบีท และกากน้ำตาล โดยจะผลิตผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ซึ่งยีสต์สามารถย่อยสลายวัตถุดิบประเภทนี้ได้ทันที โดยไม่ต้องผ่านการย่อยเพื่อเป็นน้ำตาล (Pretreatment) ก่อนเหมือนวัตถุดิบประเภทแป้ง
2. **แป้ง** ได้แก่ มันสำปะหลัง ธัญพืช และมันฝรั่ง โดยในการผลิตจะต้องย่อยแป้งในวัตถุดิบให้เป็นน้ำตาลกลูโคส ซูโครส หรือฟรุกโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อน ยีสต์จึงจะเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้

3. **เส้นใย** เช่น กากอ้อย ฟางข้าว ซังข้าวโพด ขี้เลื่อย รวมถึง ของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ฯลฯ วัตถุดิบชนิดนี้จะนำไปผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันเพื่อให้ได้แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) จากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปช์เพื่อเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นเอทานอลหรือแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 2.7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวล [20]

ชื่อ	ปฏิกิริยา
การปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ (Steam reforming)	$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$
ปฏิกิริยาบาวดาร์ด (Boudouard reaction)	$C + CO_2 \longrightarrow 2CO$
ปฏิกิริยาวอเตอร์-แก๊สชิฟต์ (Water-gas shift)	$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$
การเกิดมีเทน (Methanation reaction)	$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$

ตารางที่ 2.8 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปช์ของการสังเคราะห์แอลกอฮอล์ [20]

ผลิตภัณฑ์	ปฏิกิริยา
เมทานอล	$CO + 2H_2 \longrightarrow CH_3OH$
มีเทน	$CH_3OH + 2H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$
เอทานอล	$CO + 2H_2 + CH_3OH \longrightarrow C_2H_5OH + H_2O$
อีเทน	$H_2 + C_2H_5OH \longrightarrow C_2H_6 + H_2O$

โพรพานอล	$CO + 2H_2 + C_2H_5OH \longrightarrow C_3H_7OH + H_2O$
โพรเพน	$H_2 + C_3H_7OH \longrightarrow C_3H_8 + H_2O$
บิวทานอล	$CO + 2H_2 + C_3H_7OH \longrightarrow C_4H_9OH + H_2O$
บิวเทน	$H_2 + C_4H_9OH \longrightarrow C_4H_{10} + H_2O$
เพนทานอล	$CO + 2H_2 + C_4H_9OH \longrightarrow C_5H_{11}OH + H_2O$
เพนเทน	$H_2 + C_5H_{11}OH \longrightarrow C_5H_{12} + H_2O$

2.8.1 กระบวนการผลิตแอลกอฮอล์

กระบวนการผลิตแอลกอฮอล์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ

- กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis) และ
- กระบวนการหมัก(Fermentation)

กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis)

วิธีนี้ประกอบด้วยสองกระบวนการ คือ กระบวนการแกซิฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นแก๊สสังเคราะห์ และนำไปผ่านกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์เพื่อเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแอลกอฮอล์

กระบวนการแกซิฟิเคชันเปลี่ยนวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม เชื้อเพลิงชีวภาพ และชีวมวล ให้กลายเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยเผาวัตถุดิบด้วยความร้อนสูง พร้อมกับควบคุมปริมาณออกซิเจนและไอน้ำ ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันแสดงในตาราง 2.7

หลังจากผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันแล้วจะเข้าสู่การสังเคราะห์แอลกอฮอล์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.8 กระบวนการของแต่ละโรงงานผลิตใช้ภาวะไม่เหมือนกัน ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการของ S. Phillips และคณะ [20] ซึ่งดำเนินที่ภาวะ 570 องศาฟาเรนไฮท์ 986

ความดันสัมบูรณ์ ใช้ซิงค์โครเมียมออกไซด์ ZnCrO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อัตราส่วนโดยโมล CO/H_2 1:1

กระบวนการหมัก (Fermentation)

วิธีนี้เป็นการผลิตเอทานอลจากน้ำตาล หรือแป้ง โดย กระบวนการหมักด้วยเชื้อยีสต์ โดยยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลทั้ง ในรูปเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อน เช่น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) น้ำตาลฟรุกโ ตส (Fructose) น้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) น้ำตาลแมนโนส (Mannose) น้ำตาลซูโครส (Sucrose) น้ำตาลแรฟฟิโนส (Raffinose) เป็นต้น ในกลไกการผลิตเอทานอลของยี สต์นั้น ยีสต์จะใช้น้ำตาลเป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลโดยผ่ านกระบวนการที่เรียกว่า ไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในภาวะ ไร้อ อกซิเจน ซึ่งตามทฤษฎีในกระบวนการหมัก น้ำ ตาลกลูโคสจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอลร้อยละ 48.89 และ 51.11 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติอาจจะเกิดเป็นสารประกอบอื่นหรือ ถูกใช้ไปในการสร้างเซลล์ของยีสต์ได้ ดังนั้นในความเป็นจริงแล้วน้ำตาลเพียงร้อยละ 95 เท่านั้นที่จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นเอทานอล ส่วนที่เหลือ ยีสต์จะใช้สำหรับการเจริญเติบโตของตัวมันเองและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ อื่นๆ ซึ่งในการหมัก น้ำ ตาลด้วย ยีสต์จะ ได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆนอกเหนือจากเอทานอล (ร้อยละ 48.4) ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 46.5) อะเซทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กรดอะซิตริก (Acetic acid) กลีเซอรีน (Glycerine) กรดแลกติก (Lactic acid) กรดซักซินิก (Succinic acid) และเฟอฟิวรัล (Furfural) ซึ่งปริมาณของสารเหล่านี้ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และภาวะที่ใช้ในการหมัก ด้วย สารอื่นที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการทำเอทานอลบริสุทธิ์

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักแล้วน้ำหมักที่ได้จะผ่านสู่กระบวนการกลั่น (Distillation) เพื่อทำให้เอ ทานอลมีความบริสุท ธิ์เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 95 โดยปริมาตร) ในระหว่ างการก ลั่นนี้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักจะถูกแยกออกไป เอทานอล ที่เข้มข้นจะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการกำจัดน้ำ (dehydration) เพื่อให้ได้เอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous ethanol) ที่เข้มข้นมากกว่ าร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร

ประโยชน์ที่ได้จากการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง

การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง สามารถทำได้หลายระดับ ตั้งแต่นำไปผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วน 10 : 90 เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 จนถึง E100 ซึ่งเป็นการใช้เอทานอล100% เป็นเชื้อเพลิงก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติและประชาชนคนไทยมากมหาศาล ดังนี้

1. การใช้เอทานอลช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด

2. การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้ปริมาณก๊าซพิษในบรรยากาศลดลง เพราะเผาไหม้ได้สมบูรณ์กว่าการใช้ MTBE เป็นสารเพิ่มค่าออกเทน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า ช่วยให้คุณภาพชีวิตดีขึ้น

3. การใช้เอทานอลที่ผลิตจากพืชผลการเกษตร ช่วยลดการนำเข้า และการพึ่งพาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจากต่างประเทศ ช่วยให้เกิดการแปรรูปผลผลิตการเกษตรเพื่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มต่อสินค้าการเกษตรภายในประเทศ

4. ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทั้งในด้านการผลิตและการใช้ประโยชน์ สร้างงานและสร้างรายได้ให้กับเศรษฐกิจครัวเรือนภาคการเกษตร สร้างผลตอบแทนทางเศรษฐกิจให้กับประเทศ

บทที่ 3

การคำนวณเอเมอร์จีและการจำลองกระบวนการ

3.1 การคำนวณเอเมอร์จี

จากที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 2 เกี่ยวกับความหมายและแนวคิดเกี่ยวกับเอเมอร์จี ในส่วนที่ 3.1 นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณเอเมอร์จีเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณส่วนที่ 3.2 ดัชนีความยั่งยืน ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถเข้าใจและวิเคราะห์ระบบที่ศึกษาได้ง่ายขึ้น

การคำนวณเอเมอร์จีเริ่มจากการเขียนแผนผังเอเมอร์จีของกระบวนการเพื่อแสดงสายพลังงานที่เกี่ยวข้องทั้งที่อยู่ภายในระบบและที่มาจากภายนอกระบบโดย

1. ขั้นแรกเริ่มจากการกำหนดขอบเขตของระบบเพื่อแยกส่วนที่อยู่ภายในระบบและส่วนที่มาจากภายนอกระบบ
2. ขั้นที่ 2 แสดงรายการแหล่งทรัพยากรที่สำคัญต่อระบบ (ส่วนที่ส่งผลอย่างมากต่อระบบ เช่น ในระบบนี้คือ ปริมาณฝน แสงอาทิตย์ และวัสดุหรือค่าจ้างต่างๆ)
3. ขั้นที่ 3 แสดงรายการส่วนประกอบสำคัญในระบบ หรือกระบวนการในระบบที่เกิดขึ้นตามลำดับ
4. ขั้นที่ 4 แสดงความต่อเนื่องกันของแต่ละส่วนที่รายการไว้ในขั้นที่สาม และทรัพ ยากรที่รายการไว้ในขั้นที่สอง
5. ขั้นที่ 5 เขียนแผนผังกระบวนการโดยเริ่มจากแหล่งทรัพยากรภายนอกให้อยู่รอบกรอบสี่เหลี่ยมซึ่งแสดงถึงขอบเขตของระบบ จากนั้นเขียนส่วนประกอบในระบบและสร้างความสัมพันธ์ของทั้งระบบ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเขียนแผนผังได้อธิบายไว้แล้วในตารางที่ 2.1 ของบทที่ 2

การคำนวณกระแสเอเมอร์จีแต่ละสาย มีขั้นตอนแสดงใน ตารางที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละคอลัมน์ดังนี้

ตารางที่ 3.1 รูปแบบตารางการคำนวณเอเมอร์จี [2]

ลำดับ	สาย	ปริมาณ	หน่วย (unit/area/time)	ทรานส์ฟอร์มิตี (seJ/unit)	อัตราเอเมอร์จี (seJ/time)
1	สายที่ 1	xxx.x	จูล/เฮคแทร์/ปี	xxx.x	Em_1
2	สายที่ 2	xxx.x	กก./เฮคแทร์/ปี	xxx.x	Em_2
--					
n	สายที่ n	xxx.x	จูล/เฮคแทร์/ปี	xxx.x	Em_n
o	ผลิตภัณฑ์	xxx.x	จูล/เฮคแทร์/ปี หรือ กก./เฮคแทร์/ปี	xxx.x	$\sum_{n}^{1} Em_i = TEm$

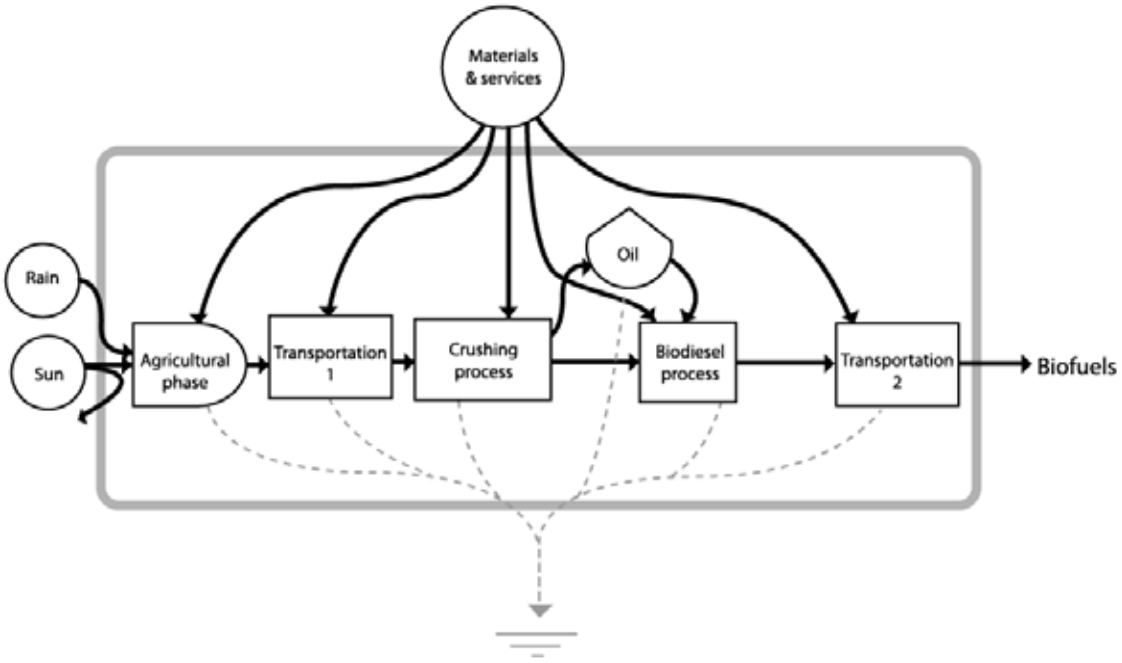
คอลัมน์ที่ 1 ลำดับของสาย ในการคำนวณสายแต่ละสายการกำหนดตัวเลขไว้จะทำให้ง่ายเมื่อมีส่วนอธิบายเพิ่มเติมหรือที่เรียกว่า ‘Footnote’

คอลัมน์ที่ 2 เป็นชื่อของแต่ละสายเพื่อบอกว่าสายนั้นคือ ทรัพยากรอะไร ซึ่งส่วนนี้หากชื่อยาวเกินไปสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ในส่วนอธิบายเพิ่มเติม

คอลัมน์ที่ 3 ปริมาณการไหลของแต่ละสาย ซึ่งส่วนนี้เป็นข้อมูลดิบที่ได้จากแหล่งอ้างอิง ปริมาณนี้อาจจะเป็นกิโลกรัมต่อปีหรือจูลต่อปีซึ่งแสดงหน่วยไว้ในคอลัมน์ที่ 4

คอลัมน์ที่ 5 เป็นค่าทรานส์ฟอร์มิตีหรือเอเมอร์จีจำเพาะซึ่ง บ่งบอกถึงปริมาณเอเมอร์จีที่ใช้ไปในการสร้างทรัพยากรนั้นๆขึ้น ค่านี้ส่วนใหญ่ได้จากงานวิจัยที่มีการคำนวณไว้แล้ว เมื่อคูณคอลัมน์ที่ 3 ด้วยคอลัมน์ที่ 5 จะได้ปริมาณเอเมอร์จีที่ไหลในสายนั้นเป็นคอลัมน์ที่ 6

คอลัมน์ที่ 6 ปริมาณเอเมอร์จีของแต่ละสาย ซึ่งค่านี้มีปริมาณมากและมักจะแสดงในรูปผลคูณทางวิทยาศาสตร์เช่น $1x10^{12}$ sej/yr หรือในหนังสือบางเล่มจะแทน $x10^{12}$ ด้วย E12 ซึ่งมีความหมายเหมือนกัน

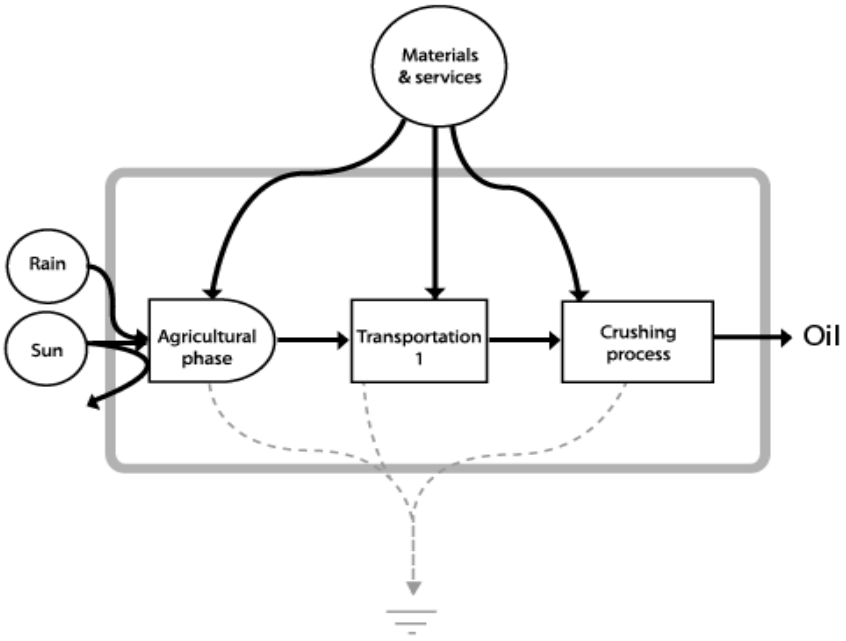


ภาพที่ 3.1 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [2]

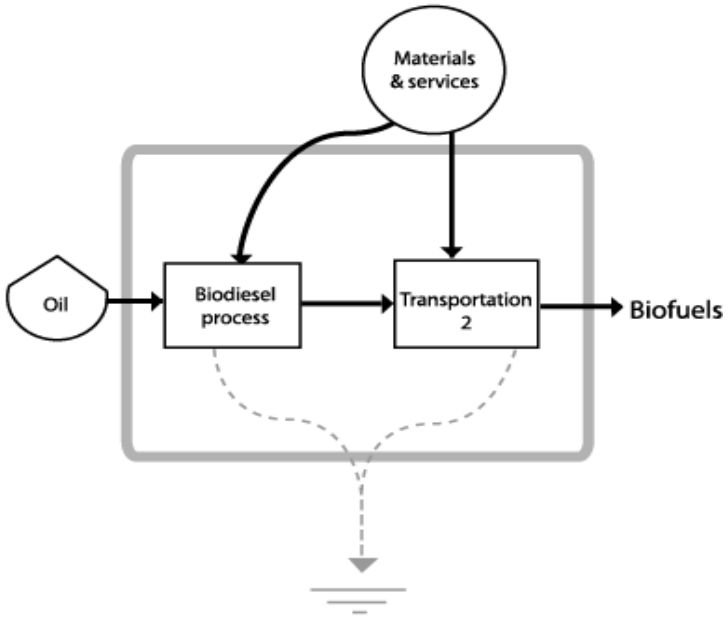
การกำหนดขอบเขตของระบบแสดงด้วยแผนผังเอเมอร์จีดังภาพที่ 3.1 ซึ่งระบบนี้ประกอบด้วยขั้นตอน 4 ขั้น ได้แก่

- ขั้นการปลูก ในขั้นนี้จะมีทรัพยากรป้อนเข้า 3 สายคือ จากแสงอาทิตย์ ฝน และส่วนค่าใช้จ่ายต่างๆที่ต้องซื้อเข้ามาป้อนให้กับกระบวนการนี้ (ได้แก่ ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช ไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และแรงงานหรือค่าเครื่องมือ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นนี้คือผลปาล์ม /สบู่ดำสด
- ขั้นการหีบน้ำมัน ขั้นนี้จะนำผลปาล์ม /สบู่ดำสดที่ได้จากขั้นการปลูกมาหีบน้ำมัน โดยใช้ทรัพยากรจากภายนอกระบบเป็นหลัก (ได้แก่ ไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และแรงงานหรือค่าเครื่องมือ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นนี้คือน้ำมันดิบ
- ขั้นการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพ ในขั้นนี้จะนำน้ำมันดิบที่ได้จากขั้นก่อนมาผลิตเป็นไบโอดีเซล ซึ่งในระบบอุตสาหกรรมจำเป็นจะต้องมีหน่วยกลั่นน้ำมันดิบเพื่อให้บริสุทธิ์ก่อนเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระและนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน
- ขั้นการขนส่ง ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งของแต่ละระบบแสดงในการคำนวณภาคผนวก ก

ก)



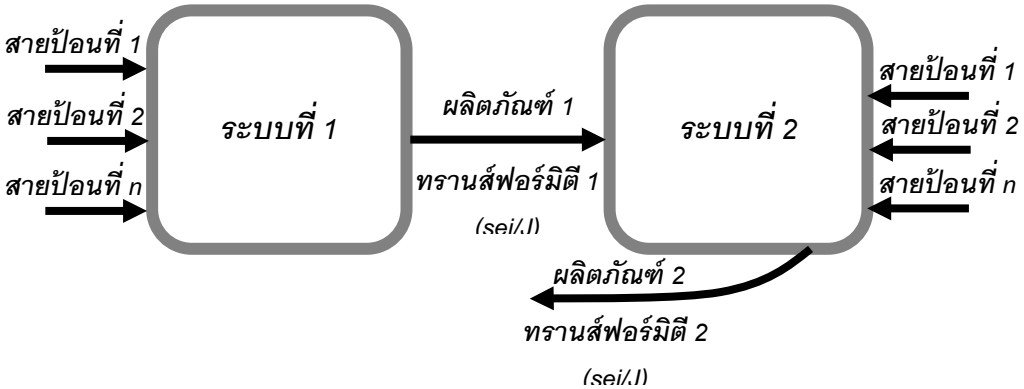
ข)



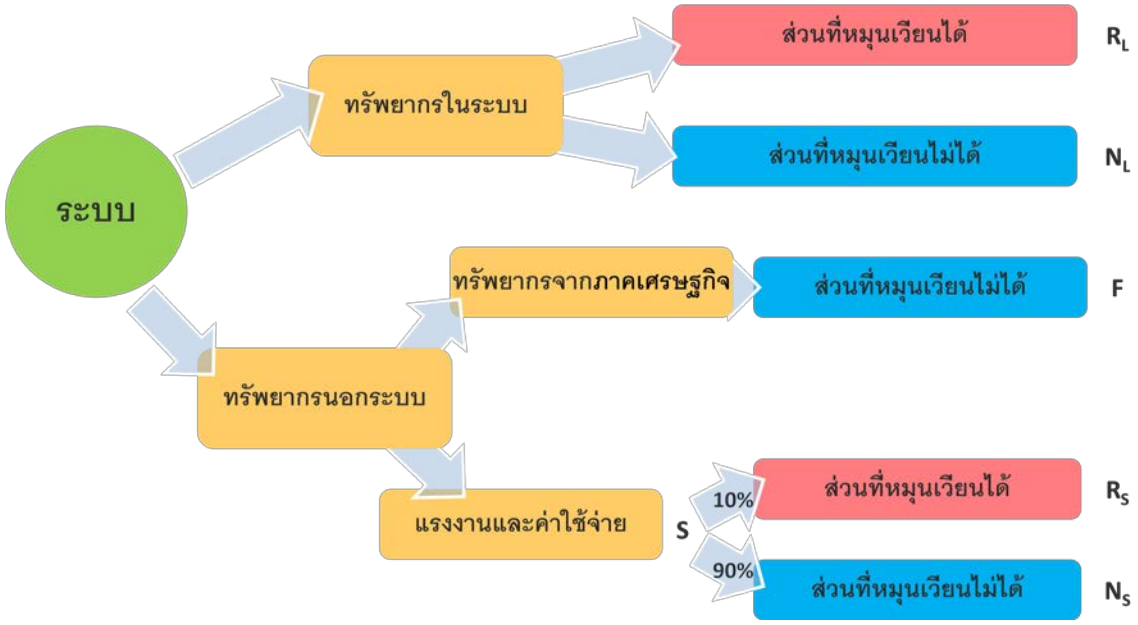
ภาพที่ 3.2 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลสองขั้น ก) ขั้นการปลูก ข) ขั้นการผลิตไบโอดีเซล [2]

จากแผนผังเอเมอร์จีของระบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ในภาพที่ 3.1 ทำให้ทราบว่าแต่ละส่วนของระบบมีการป้อนพลังงานเข้าไปอย่างไรและเท่าไรบ้าง และจะพบว่าหากประเมินเอเมอร์จีด้วยระบบที่มีส่วนประกอบและขั้นตอนดังกล่าวจะค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นการแยกระบบออกเป็น สองช่วงหลัก คือช่วงการปลูก และช่วงการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบและง่ายต่อการวิเคราะห์เพื่อนำไปพัฒนาปรับปรุงระบบ ซึ่งการแบ่งนี้จะทำให้ได้แผนผังดังภาพที่ 3.2ก และ 3.2ข

เมื่อแบ่งกระบวนการออกเป็นสองขั้นแล้ว จะเริ่มการคำนวณกระแสเอเมอร์จีจากระบบที่ 1 ขั้นการปลูกรวมถึงการหีบน้ำมันจากผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก จากภาพที่ 3.2ก จะได้ทรัพยากรที่ป้อนเข้าระบบที่ 1 นี้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันสบู่ดำซึ่งจะนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในระบบที่ 2 ดังภาพที่ 3.3 ซึ่งในการคำนวณเอเมอร์จีเราจะต้องทราบส่วนประกอบต่างๆในระบบ แสดงดังภาพที่ 3.4 โดยระบบหนึ่งจะประกอบด้วยทรัพยากรในระบบซึ่งจะแบ่งย่อยออกเป็นทรัพยากรในระบบส่วนที่หมุนเวียนได้ (R_L) เช่น แสงอาทิตย์ ฝน และทรัพยากรในระบบส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ (N_L) เช่น อินทรียวัตถุในดิน และนอกจากทรัพยากรที่มีในระบบแล้วยังจำเป็นต้อง อาศัยทรัพยากรจากนอกระบบ ซึ่งแบ่งออกเป็นทรัพยากรจากภาคเศรษฐกิจ (F) เช่น ปุ๋ย สารเคมีต่างๆ เชื้อเพลิง ซึ่งล้วนเป็นทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้ และอีกส่วนคือแรงงานและค่าใช้จ่าย (S) ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนที่หมุนเวียนได้และส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ เนื่องจากแรงงานและค่าใช้จ่ายนี้มีหน่วยเป็นเม็ดเงิน เกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งสัดส่วนนี้ในแต่ละประเทศจะแตกต่างกันไปตามปริมาณทรัพยากรและเศรษฐกิจในประเทศ ในประเทศไทยมีส่วนที่หมุนเวียนได้เพียง 10 เปอร์เซนต์ ที่เหลือเป็นส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ ข้อมูลนี้มีการคำนวณไว้ในฐานข้อมูลของ The National Environmental Accounting Database (NEAD) ในเว็บไซต์ sahel.ees.ufl.edu ซึ่งปรับปรุงล่าสุดในปีค.ศ. 2000 [21]



ภาพที่ 3.3 แผนผังการคำนวณ



ภาพที่ 3.4 แผนผังตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

3.2 การคำนวณดัชนีความยั่งยืน

ลำดับรายการดัชนีความยั่งยืนและสูตรที่ใช้คำนวณมีดังนี้

1. เอเมอร์จีในระบบ (Yield) ซึ่งคิดตามกฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อแรกที่ว่า "ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่างๆ นั้น พลังงานจะไม่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่และไม่มีการสูญหายไป แต่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปอื่นได้" ดังนั้นผลได้ของระบบจึงเกิดจากผลรวมของเอเมอร์จีที่ป้อนให้กับระบบ

$$Y = R + N \qquad (3.1)$$

โดย R คือเอเมอร์จีจากทรัพยากรส่วนที่หมุนเวียนได้ N คือเอเมอร์จีจากทรัพยากรส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ เอเมอร์จีในระบบที่คำนวณได้คือปริมาณเอเมอร์จีทั้งหมดที่ถูกนำไปแปลงให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ มีค่าเท่ากับ TEm ในตารางที่ 3.1

2. ทรานส์ฟอร์มิตี (Transformity) หลังจากที่ได้ ค่าเอเมอร์จีในระบบซึ่งก็คือเอเมอร์จีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในข้อ 1 แล้ว ค่าทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ สามารถหาได้ ตาม

สมการที่ 3.2 เพื่อจะบอกว่าการสร้างผลิตภัณฑ์ปริมาณ 1 จูล ต้องใช้เอเมอร์จีจากทรัพยากรทั้งหมดไปปริมาณกี่โซลาร์เอ็มจูล (sej)

$$\text{Transformity of products} = \frac{\text{Total Solar emergy flow (Yield)}}{\text{Total Energy flow of products}} \quad (3.2)$$

3. ร้อยละส่วนที่หมุนเวียนได้ (%R) $\%R = R / (R + N + F)$
   ซึ่ง F คือเอเมอร์จีจากทรัพยากรภายนอกจากภาคเศรษฐกิจที่ต้องนำเข้ามาในระบบ
4. สัดส่วนภาระต่อสิ่งแวดล้อม $ELR = (N + F) / R$
5. สัดส่วนเอเมอร์จีที่ได้ $EYR = Y / F$
6. ดัชนีความยั่งยืน $ESI = EYR / ELR$

3.3 การจำลองกระบวนการ

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์เอเมอร์จีและดัชนีความยั่งยืนของกรณีศึกษาที่มีข้อมูลอยู่จริง จะทำให้ทราบถึงข้อบกพร่องและส่วนของระบบที่น่าจะพัฒนาและปรับปรุงได้ การจำลองกระบวนการที่พัฒนาจากกระบวนการเดิมจึงเกิดขึ้นเป็นกรณีศึกษาในหัวข้อ 3.3 นี้ ซึ่งหลังจากจำลองด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS® แล้ว จะนำข้อมูลที่ได้ ทั้งสารเคมี พลังงานไฟฟ้า แรงงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปคำนวณเอเมอร์จีซ้ำตามหัวข้อ 3.1 และ 3.2

ในแบบจำลองกระบวนการจะใช้การคำนวณสมบัติของสารโดยใช้แบบจำลอง UNIQUAC ในการคำนวณสมบัติของสารทั้งหมด สำหรับสารที่ไม่มีในฐานข้อมูลของโปรแกรม ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะใช้สมบัติตามแบบจำลองของ NREL มาคำนวณ [20] ส่วนไตรโอเลอิน ไดโอเลอิน โมโนโอเลอิน โมโนโอลิเอต หรือเอทิลโอลิเอต ซึ่งอยู่ในส่วนการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะใช้รูปร่างของโมเลกุล ซึ่งสามารถจำลองได้ด้วยโปรแกรม GaussViewW หรือสามารถดาวน์โหลดไฟล์โมเลกุลสำเร็จรูปได้จากเว็บไซต์ PubChem หรือ ChemSpider และใช้ Aspen Properties® จำลองสมบัติของสารนั้นขึ้นมา

ในงานวิจัยนี้จะมีการพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีกระบวนการผลิตอยู่ในประเทศไทย ซึ่งส่วนนี้จะประกอบด้วยการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบและขนาดอุตสาหกรรม การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และส่วนที่สองเป็นส่วนที่จำลองขึ้นด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS® ซึ่งแบ่งได้เป็น 7 กรณีศึกษาดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในระบบขนาดต้นแบบ ข้อมูลในขั้นการปลูกและการหีบน้ำมันมาจากแหล่งอ้างอิงในหัวข้อ 2.4 ส่วนข้อมูลขั้นการผลิตไบโอดีเซลอ้างอิงในหัวข้อ 2.5 ซึ่งได้จากกรมอู่ทหารเรือ มีกำลังการผลิต 20,000 ลิตรต่อวัน

กรณีศึกษาที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในระบบขนาดอุตสาหกรรม ข้อมูลในขั้นการปลูกและการหีบน้ำมันมาจากแหล่งอ้างอิงในหัวข้อ 2.4 ส่วนข้อมูลขั้นการผลิตไบโอดีเซลอ้างอิงในหัวข้อ 2.6 ซึ่งได้จากงานวิจัยของ Gonsalves [17] มีกำลังการผลิต 330,000 ลิตรต่อวัน

กรณีศึกษาที่ 3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในระบบขนาดต้นแบบ ข้อมูลในขั้นการปลูกและการหีบน้ำมันมาจากแหล่งอ้างอิงในหัวข้อ 2.7 ส่วนข้อมูลขั้นการผลิตไบโอดีเซลอ้างอิงในหัวข้อ 2.7.3 ซึ่งได้จากกรมอู่ทหารเรือ มีกำลังการผลิต 20,000 ลิตรต่อวัน

กรณีศึกษาที่ 4 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม จำลองด้วยโปรแกรม APEN PLUS® เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบจริงกำลังการผลิต 330,000 ลิตรต่อวัน และระบบจำลองกำลังการผลิตเดียวกัน

กรณีศึกษาที่ 5 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 1 ซึ่งเป็นแบบจำลอง กระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ผ่านกระบวนการหมัก และนำแอลกอฮอล์นั้นมาผลิตเป็นไบโอดีเซลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในภาวะเหนือวิกฤต

กรณีศึกษาที่ 6 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบจำลอง กระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันและฟิชเชอร์ทรอปซ์ หลังจากนั้นนำแอลกอฮอล์ที่ได้มาผลิตเป็นไบโอดีเซลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบทั่วไปดังในกรณีศึกษาที่ 4

กรณีศึกษาที่ 7 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 2 แบบปรับปรุง เป็นการนำแบบจำลองที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 6 มาปรับปรุงโดยเพิ่มส่วนผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำจากแก๊สตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไปเผาไหม้ให้เกิดความร้อนนำมาผลิตไอน้ำความดันสูงและนำไปปั่นไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่เหลือจะนำไปใช้ในระบบ

3.4 ข้อมูลที่ใช้คำนวณในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลสำหรับขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 2 4 5 6 และ 7

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
1	รังสีอาทิตย์บนผิวโลก (Insolation)	18.2	$MJ/m^2/day$	[22]				1	sej/J	ทฤษฎี
2	ระดับน้ำฝน	1.49×10^3	mm/yr	[23]				3.06×10^4	sej/J	[24]
3	อัตราการสูญเสียหน้าดินจากพืชไร่	31.4	ton/ha/yr	[25]						
	อัตราส่วนปริมาณอินทรียวัตถุในดิน	0.013	kg/kg soil	[26]	1.46×10^{10}	J/ton	[27]	2.25×10^5	sej/J	[24]
4	เมล็ดพันธุ์ที่ใช้	168	kg/ha/yr	[12]	0.99	MJ/kg	[13]			
5	ปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้	7.79	kg/ton FFB[ก]	[10]				6.38×10^{12}	sej/kg	[2]
	[ก]FFB คือ Fresh fruit bunch หรือผลปาล์มสด									
6	ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใช้	0.05	kg/ton FFB	[10]				6.55×10^{12}	sej/kg	[2]
7	ปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียมที่ใช้	14.41	kg/ton FFB	[10]				1.85×10^{12}	sej/kg	[2]
8	ยาฆ่าแมลง ไกลโฟเสต (glyphosate)	0.28	kg/ton FFB	[10]				2.48×10^{13}	sej/kg	[24]
9	ยาฆ่าแมลง พาราควอต (paraquat)	0.1	kg/ton FFB	[10]				2.48×10^{13}	sej/kg	[24]

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
	การขนส่ง									
10	ความจุรถบรรทุก	3,000	kg/round	[18]						
	ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้	1.628	km/L	[18]						
	ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล	0.832	kg/L	[18]	4.184×10^{7}	J/kg	[28]	1.10×10^{5}	sej/J	[24]
	แรงงานและค่าใช้จ่าย (ข้อมูลจากกรมส่งเสริมการเกษตร)									
11	*ค่าแรง*									
	ค่าจ้างใส่ปุ๋ย	72	baht/rai/y							
	ค่าตัดแต่งทางใบ	280	baht/rai/yr							
	ค่ากำจัดวัชพืช	260	baht/rai/yr							
	ค่าเก็บเกี่ยวทะลาย	1,080	baht/rai/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
12	*ค่าจ้างอื่นๆ*	720	baht/rai/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
13	*ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์*	120	baht/rai/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
	การหีบน้ำมัน									
14	ปริมาณไฟฟ้า	2.57	kWh/tonFFB	[14]				3.36×10^{5}	sej/J	[2]
15	น้ำมันดีเซล (สำหรับเดินเครื่อง)	0.189	L/ton FFB	[14]				1.10×10^{5}	sej/J	[24]
16	ปริมาณน้ำหล่อเย็น	0.858	kg/ton FFB	[14]				2.03×10^{8}	sej/kg	[29]

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
	แรงงานและค่าใช้จ่ายในการหีบน้ำมัน									
17	ค่าแรงต่อตันของผลปาล์ม	55	baht/ton FFB	[14]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]
18	ค่าบำรุงรักษาต่อตันของผลปาล์ม	91.7	baht/ton FFB	[14]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]
19	ค่าเสื่อมราคาต่อตันของผลปาล์ม	83.3	baht/ton FFB	[14]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง
น้ำมันปาล์มที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด	178	kg/ton FFB	[14]	4.014×10^{7}	J/kg	[1]
เนื้อเมล็ดที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด	55	kg/ton FFB	[14]	1.7×10^{7}	J/kg	[30]
เปลือกที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด	55	kg/ton FFB	[14]	1.846×10^{7}	J/kg	[31]
เส้นใยที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด	140	kg/ton FFB	[14]	9.2×10^{6}	J/kg	[32]
ทะลายที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด	230	kg/ton FFB	[14]	1×10^{7}	J/kg	[33]

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสำหรับขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 1 (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
1	ปริมาณเมทานอล	424.37	kg/ha/yr					7.23×10^{9}	sej/g	[16]
2	ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	3.46	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
3	ปริมาณเรซิน	107.33	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
4	ปริมาณไฟฟ้า	4.58×10^{8}	J/ha/yr					3.36×10^{5}	sej/J	[2]
	แรงงานและค่าใช้จ่าย									
5	ค่าแรง	135.03	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
6	ค่าบำรุงรักษา	149.42	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
7	ค่าเสื่อมราคา	17.86	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง
ไบโอดีเซลที่ได้	2436.19	kg/ha/yr		3.81×10^{7}	J/kg	[1]
กลีเซอรอลที่ได้	438.51	kg/ha/yr		1.9×10^{7}	J/kg	[1]

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลสำหรับขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 2

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
1	ปริมาณเมทานอล	303.95	kg/ha/yr	[17]				7.23×10^{9}	sej/g	[16]
2	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	3.13	kg/ha/yr	[17]				6.38×10^{9}	sej/g	[2]
3	ปริมาณไอน้ำ	107.33	kg/ha/yr	[17]				1.30×10^{9}	sej/g	[34]
4	ปริมาณน้ำหล่อเย็น	1.25×10^{4}	kg/ha/yr	[17]				6.64×10^{5}	sej/g	[29]
5	ปริมาณไฟฟ้า	2.93×10^{8}	J/ha/yr	[17]				3.36×10^{5}	sej/J	[2]
	แรงงานและค่าใช้จ่าย									
6	ค่าแรง	69.25	$/ha/yr	[17]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]
7	ค่าบำรุงรักษา	123.32	$/ha/yr	[17]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]
8	ค่าเสื่อมราคา	95.81	$/ha/yr	[17]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง
ไบโอดีเซลที่ได้	2484.62	kg/ha/yr	[17]	3.81×10^{7}	J/kg	[1]
กลีเซอรอลที่ได้	512.75	kg/ha/yr	[17]	1.9×10^{7}	J/kg	[1]

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลสำหรับขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
1	รังสีอาทิตย์บนผิวโลก (Insolation)	18.2	$MJ/m^2/day$	[22]				1	sej/J	ทฤษฎี
2	ระดับน้ำฝน	1.49×10^3	mm/yr	[23]				3.06×10^4	sej/J	[24]
3	อัตราการสูญเสียหน้าดินจากพืชไร่	31.4	ton/ha/yr	[25]						
	อัตราส่วนปริมาณอินทรียวัตถุในดิน	0.013	kg/kg soil	[26]	1.46×10^{10}	J/ton	[27]	2.25×10^5	sej/J	[24]
4	เมล็ดพันธุ์ที่ใช้	825	kg/ha/yr	[35]						
5	ปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้	104.2	kg/ha/yr	[18]				6.38×10^{12}	sej/kg	[2]
6	ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใช้	104.2	kg/ton FFB	[18]				6.55×10^{12}	sej/kg	[2]
7	ปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียมที่ใช้	104.2	kg/ton FFB	[18]				1.85×10^{12}	sej/kg	[2]
8	ยาฆ่าแมลง ไกลโฟเสต (glyphosate)	0.00144	kg/ha/yr	[18]				2.48×10^{13}	sej/kg	[24]
9	ยาฆ่าแมลง พาราควอต (paraquat)	0.00055	kg/ha/yr	[18]				2.48×10^{13}	sej/kg	[24]
	การขนส่ง									
10	ความจุรถบรรทุก	3,000	kg/round	[18]						
	ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้	1.628	km/L	[18]						
	ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล	0.832	kg/L	[18]	4.184×10^7	J/kg	[28]	1.10×10^5	sej/J	[24]

ลำดับ	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
	แรงงานและค่าใช้จ่าย (ข้อมูลจากกรมส่งเสริมการเกษตร)									
11	*ค่าแรง*									
	ค่าจ้างใส่ปุ๋ย (2 คนต่อไร่ 2 ครั้งต่อปี)	440	baht/rai	(2 คนต่อไร่ 2 ครั้งต่อปี)						
	ค่าตัดแต่งทางใบ	220	baht/rai/yr	(2 คนต่อไร่ 1 ครั้งต่อปี)						
	ค่ากำจัดวัชพืช	220	baht/rai/yr	(2 คนต่อไร่ 1 ครั้งต่อปี)						
	ค่าเก็บเกี่ยวทะลาย	440	baht/rai/yr	(2 คนต่อไร่ 20 ครั้งต่อปี)				3.70×10^{12}	sej/$	[24]
12	*ค่าจ้างอื่นๆ*	720	baht/rai/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
13	*ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์*	120	baht/rai/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
	การหีบน้ำมัน									
14	ปริมาณไฟฟ้า							3.36×10^{5}	sej/J	[2]
	ไฟฟ้าที่ใช้ในการแตกเมล็ด (Cracking)	100-200	กิโลกรัมของเมล็ดต่อชม.ใช้ไฟฟ้า 2 hp (0.031 kg/s)							[18, 35, 36]
	ไฟฟ้าที่ใช้ในการบดและหีบน้ำมัน	12.2-2	ลิตรน้ำมันสบู่ดำต่อชม. (L JO/hr) ใช้ไฟฟ้า 5 hp (0.0045 L/s)							[18, 35, 36]
	ไฟฟ้าที่ใช้ในการกรองน้ำมัน	150-170	ลิตรน้ำมันสบู่ดำต่อชม. (L JO/hr) ใช้ไฟฟ้า 2 hp (0.044 L/s)							[18, 35, 36]
	แรงงานและค่าใช้จ่ายในการหีบน้ำมัน									
15	ค่าแรง	0.134	$/ha/yr	[18, 35, 36]				3.70×10^{12}	sej/$	[24]
16	น้ำหนักเครื่องหีบน้ำมัน (เหล็ก)	0.17	kg/ha/yr	[18, 35, 36]				1.13×10^{13}	sej/kg	[24]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง
น้ำมันสบู่ดำที่ได้ต่อตันผลสบู่ดำสด	230	kg/ton FFB	[18]	3.96×10^7	J/kg	[18]
เนื้อเมล็ดที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด	750	kg/ton FFB	[18]	1.88×10^7	J/kg	[18]

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลสำหรับขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 3 (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

	รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	อ้างอิง
1	ปริมาณเมทานอล	416.48	kg/ha/yr					7.23×10^9	sej/g	[16]
2	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	18.30	kg/ha/yr					6.38×10^9	sej/g	[2]
3	ปริมาณเรซิน	71.38	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
4	ปริมาณไฟฟ้า	4.12×10^8	J/ha/yr					3.36×10^5	sej/J	[2]
	แรงงานและค่าใช้จ่าย									
5	ค่าแรง	91.05	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
6	ค่าบำรุงรักษา	100.76	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]
7	ค่าเสื่อมราคา	12.04	$/ha/yr					3.70×10^{12}	sej/$	[24]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

รายการ	ข้อมูล	หน่วย	อ้างอิง	พลังงานกิบส์	หน่วย	อ้างอิง
ไบโอดีเซลที่ได้	1911.88	kg/ha/yr		3.81×10^{7}	J/kg	[1]
กลีเซอรอลที่ได้	412.56	kg/ha/yr		1.9×10^{7}	J/kg	[1]

บทที่ 4
ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาความยั่งยืนของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ความรู้เรื่องการวิเคราะห์เอเมอร์จีซึ่งเป็นแนวคิดใหม่เพื่อแสดงผลกระทบที่มีต่อทั้งทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการวิเคราะห์ผล แบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีกระบวนการผลิตอยู่ในประเทศไทย ซึ่งส่วนนี้จะประกอบด้วยการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบซึ่งได้รับข้อมูลมาจากงานวิจัยของกรมอู่ทหารเรือ ขนาดอุตสาหกรรมซึ่งอ้างอิงมาจากการเก็บข้อมูลในงานวิจัยของ Gonsalves [17] การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ส่วนที่สองเป็นส่วนที่จำลองขึ้นด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS® ประกอบด้วยการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบทั่วไปเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง และการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยแอลกอฮอล์ซึ่งผลิตจากกากเหลือของชีวมวลในระบบ ผลที่ได้จากการจำลองจะนำไปคำนวณเอเมอร์จีเช่นเดียวกับในส่วนแรกและนำมาวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของแต่ละกระบวนการ และปรับปรุงเพื่อให้ได้ความยั่งยืนของระบบที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.1 กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้

ส่วน	สารตั้นต้น	รายละเอียด	กรณีที่
1. กระบวนการจริง	ปาล์มน้ำมัน	ระบบขนาดต้นแบบ	1
		ระบบขนาดอุตสาหกรรม	2
	สบู่ดำ	ระบบขนาดต้นแบบ	3
2. การจำลอง	ปาล์มน้ำมัน	ระบบทั่วไป	4
		ระบบที่ใช้แอลกอฮอล์แบบที่ 1	5
		ระบบที่ใช้แอลกอฮอล์แบบที่ 2	6
		ระบบที่ใช้แอลกอฮอล์แบบที่ 2 ปรับปรุง	7

4.1 ผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย

ในส่วนนี้จะทำการ คำนวณเอเมอร์จีและดัชนีความยั่งยืนของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีในประเทศไทย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าส่วนนี้พิจารณากระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยแบ่งเป็นกรณีศึกษา 3 กรณี เริ่มต้นด้วยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันปาล์มซึ่งมีทั้งขนาดต้นแบบและขนาดอุตสาหกรรม ในสองกรณีนี้จะเปรียบเทียบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของระบบแล้วจะส่งผลต่อความยั่งยืนอย่างไร และต่อมาเป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันสบู่ดำซึ่งตอนนี้สบู่ดำยังไม่เป็นที่นิยมมากนักจึงมีเพียงข้อมูลของระบบขนาดต้นแบบ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเป็นหลัก มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อการบริโภค ซึ่งกรณีศึกษาที่สามนี้จะช่วยให้ทราบว่าการนำสบู่ดำมาทดแทนปาล์มน้ำมันนั้นจะส่งผลกระทบอย่างไรต่อความยั่งยืนของระบบ

สมมุติฐานที่ใช้

1. ปาล์มน้ำมันและสบู่ดำถือเป็นพืชไร่หมือนกัน จึงสมมุติให้มีค่าการดูดซึมอินทรียวัตถุเท่ากัน
2. สมมุติให้การปลูกปาล์มน้ำมันและสบู่ดำอยู่ในบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งทำให้พลังงานจากแสงอาทิตย์ ฝน รวมถึงปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่ได้รับมีเท่ากัน
3. ขั้นการปลูกปาล์มน้ำมันสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันปาล์มทุกกรณีศึกษามีข้อมูลมาจากแหล่งเดียวกัน
4. ในกรณีศึกษาทั้งหมดสมมุติให้ระยะทางที่ใช้ขนส่งทุกกรณีศึกษามีค่าเท่ากัน และปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ไปในการขนส่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำหนักของสินค้าที่รถบรรทุก
5. ข้อมูลขั้นการทำน้ำมันปาล์มดิบให้บริสุทธิ์ในกรณีศึกษาที่ 2 มีไม่เพียงพอ จึงสมมุติฐานให้ตัดส่วนนี้ออกไปและใช้น้ำมันดิบเป็นสารตั้งต้น
6. ข้อมูลต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปาล์มน้ำมันและสบู่ดำในระบบขนาดต้นแบบ (กรณีศึกษาที่ 1 และ 3) ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดต้นแบบของ กรมอู่ทหารเรือ โดยเป็นข้อมูลที่ปรับปรุงแล้วในปี 2554
7. ข้อมูลต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปาล์มน้ำมันในระบบขนาดอุตสาหกรรม (กรณีศึกษาที่ 2) ได้จากงานวิจัยของ Gonsalves [17] โดยเป็นข้อมูลที่ปรับปรุงแล้วในปี 2549

4.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบ

ตารางที่ 4.2 และ 4.4 แสดงปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการ โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นหลักคือ ขั้นการปลูก และขั้นการผลิตไบโอดีเซล ในแต่ละขั้นจะมีส่วนประกอบย่อยอยู่ภายในได้แก่ ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้ ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้ ทรัพยากรนำเข้า แรงงาน และค่าใช้จ่าย ขั้นตอนการคำนวณเอเมอร์จีของแต่ละสายแสดงไว้ในส่วนภาคผนวก

จากตารางที่ 4.2 แสดงกระแสเอเมอร์จีในขั้นการปลูกแต่ละสาย โดยแบ่งเป็นทรัพยากรในระบบ ซึ่งแบ่งย่อยออกไปอีกเป็นทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้ (Local renewable resources, R_L) ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณน้ำฝน ซึ่งมีปริมาณเอเมอร์จี 2.32×10^{15} sej/ha/yr คิดเป็นร้อยละ 30 ของเอเมอร์จีในขั้นนี้ และทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้ (Local non-renewable resources, N_L) ได้แก่ อินทรียวัตถุในดินปริมาณ 1.34×10^{15} sej/ha/yr คิดเป็นร้อยละ 17 จะพบว่าปริมาณทรัพยากรในระบบที่ถูกใช้คิดเป็นร้อยละ 47 หรือเกือบครึ่งหนึ่งของเอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก เนื่องจากปาล์มเป็นพืชที่ต้องการน้ำปริมาณมากและบริเวณที่ปลูกปาล์มเป็นจำนวนมากอยู่ในภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งมีปริมาณน้ำฝนมากเพียงพอต่อการปลูกปาล์มน้ำมัน การเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมันในระบบนี้ใช้ทรัพยากรในระบบอย่างเดียวไม่เพียงพอ จำเป็นจะต้องมีส่วนของทรัพยากรจากภายนอกระบบเข้ามาเพื่อให้ระบบสมบูรณ์ เริ่มจากปุ๋ยที่ต้องใส่เพิ่มเพื่อให้ได้ผลผลิตตามต้องการ และดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ว่าหากมีการนำกากเหลือหลังจากการหีบน้ำมันมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์จะช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยลงไปได้ค่อนข้างมาก เอเมอร์จีที่ถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญของระบบนี้ คือแรงงานและค่าใช้จ่ายซึ่งคิดเป็นร้อยละ 30 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูกนี้ ซึ่งค่าส่วนนี้จะผันผวนไปตามภาคเศรษฐกิจของประเทศ ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการขนส่งแปรผันตามน้ำหนักสินค้าที่ขนส่ง ชนิดของรถบรรทุกที่ใช้และระยะทางที่ขนส่ง ในงานวิจัยนี้สมมุติฐานให้กรณีศึกษาทั้งหมดมีชนิดของรถบรรทุกที่ใช้และระยะทางที่ขนส่งเท่ากัน ค่าที่ต่างกันคือน้ำหนักของสินค้า

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการปลูกแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งได้แก่ น้ำมันปาล์ม และกากเหลือจากการหีบน้ำมัน ซึ่งกากเหลือเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ เผาไหม้เป็นเชื้อเพลิง หรือนำไปผลิตเป็นแอลกอฮอล์ได้อีกด้วย

ค่าทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์มีสองรูปแบบ คือแบบที่รวมเอเมอร์จีของแรงงานและค่าใช้จ่ายและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีของค่าใช้จ่าย ดังที่กล่าวไปแล้วว่าค่าแรงและค่าใช้จ่ายซึ่งคิดเป็น

ปริมาณเงินมีความผันผวนค่อนข้างมาก การแยกวิเคราะห์เอเมอร์จีของระบบที่ไม่รวมส่วนนี้จะช่วยให้ทราบความเปลี่ยนแปลงเมื่อเศรษฐกิจผกผัน สำหรับทรานส์ฟอร์มิตีที่รวมและไม่รวมแรงงานและค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์มมีค่าเท่ากับ 6.52×10^4 sej/j และ 4.58×10^4 sej/j ตามลำดับ ส่วนทรานส์ฟอร์มิตีที่รวมและไม่รวมค่าแรงและค่าใช้จ่ายของชีวมวลปาล์มมีค่าเท่ากับ 3.67×10^4 sej/j และ 2.58×10^4 sej/j ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.4 แสดงเอเมอร์จีที่ไหลในขั้นการผลิตไบโอดีเซลแต่ละสาย ในขั้นนี้เอเมอร์จีจะได้มาจากทรัพยากรภายนอกระบบทั้งหมดซึ่งได้แก่ น้ำมันปาล์มซึ่งได้มาจากขั้นแรก สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาในที่นี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) และสารเคมีที่ใช้แยกผลิตภัณฑ์ (เรซิน) เอเมอร์จีปริมาณมากในขั้นนี้มาจากน้ำมันปาล์มซึ่งคิดเป็นร้อยละ 60 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ อันดับสูงรองลงมาคือเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายซึ่งรวมกับในขั้นตอนปลูกแล้วคิดเป็นร้อยละ 26 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ และเมทานอลที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันคิดเป็นร้อยละ 23 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ เมทานอลถูกใช้ไปปริมาณมากแม้จะมีการหมุนเวียนสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ได้ร้อยละ 10 ถึง 20

ระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบระบบนี้ใช้เรซินช่วยในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยมีระบบคอลัมน์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ไม่ต้องล้างน้ำ เหมือนระบบอื่น มีข้อดีตรงที่ไม่ยุ่งยากในการกำจัดน้ำจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำในภายหลัง ซึ่งเรียกว่าเป็นการล้างไบโอดีเซลแบบแห้ง (Dry washing)

ระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบนี้ใช้เอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายรวมร้อยละ 26 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไบโอดีเซลและกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง มีค่าทรานส์ฟอร์มิตีที่รวมและไม่รวมค่าแรงและค่าใช้จ่ายของไบโอดีเซลเท่ากับ1.43×10^5 sej/j และ 1.05×10^5 sej/j ตามลำดับ

แหล่งทรัพยากรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในระบบสามารถสรุปออกเป็นกลุ่มหลักๆได้ 4 กลุ่ม ได้แก่ ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้ (R_L) ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้ (N_L) ทรัพยากรนำเข้า (F) แรงงานและค่าใช้จ่าย (S) ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 4.6 และ 4.7 โดยที่เอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายจะประกอบด้วยส่วนที่หมุนเวียนได้และส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเศรษฐกิจของประเทศที่ศึกษา โดยสำหรับประเทศไทยคิดเป็นส่วนที่หมุนเวียนได้ร้อยละ 10 และอีกร้อยละ 90 เป็น

ส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ ซึ่งต่ำกว่าประเทศข้างเคียงอย่างมาเลเซียค่อนข้างมาก ประเทศมาเลเซียมีส่วนที่หมุนเวียนได้สูงถึงร้อยละ 25 และส่วนที่เหลือร้อยละ 75 ไม่สามารถหมุนเวียนได้ [21] จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าระบบมีการใช้ทรัพยากรจากภายนอกระบบร้อยละ 46 และทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้สูงถึงร้อยละ 80 ซึ่งส่วนใหญ่มาจากส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ในแรงงานและค่าใช้จ่าย และเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ตารางที่ 4.8 แสดงตัวชี้วัดความยั่งยืนของระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ โดยน้ำมันปาล์มที่ได้จากขั้นการปลูกมีผลได้ของเอเมอร์จีเท่ากับ 1.86 ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของระบบในการสร้างผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าที่มากกว่า 1 หมายถึงระบบสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณมากกว่าเอเมอร์จีที่ป้อนให้แก่ระบบ หากค่านี้น้อยกว่า 1 หมายถึงระบบจำเป็นต้องดึงเอเมอร์จีจากภายนอกระบบมาปริมาณมาก และประพฤติตัวเป็นผู้รับมากกว่าผู้สร้าง ค่าสัดส่วนภาระต่อสิ่งแวดล้อมหรือ ELR ของน้ำมันปาล์มเท่ากับ 2.09 ซึ่งหมายถึงการจะได้น้ำมันปาล์มจะต้องใช้ทรัพยากรหมุนเวียนไม่ได้สูงกว่าทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ถึงสองเท่า และดัชนีความยั่งยืนหรือ ESI ของขั้นการปลูกเท่ากับ 0.89 ใกล้เคียง 1 ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของระบบเทียบกับภาระที่สิ่งแวดล้อมได้รับมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับไบโอดีเซล มีค่า ESI นี้อยู่ที่ 0.35 แสดงว่าประสิทธิภาพของระบบค่อนข้างต่ำและยังสร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อมมาก

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 2 4 5 และ 6

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
	ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้							
1	พลังงานแสงอาทิตย์	6.64E+13	J/ha/yr	1	sej/J	6.64E+13	sej/ha/yr	1%
2	พลังงานฝน	7.37E+10	J/ha/yr	3.06E+04	sej/J	2.26E+15	sej/ha/yr	29%
	รวมส่วนที่หมุนเวียนได้					2.32E+15	sej/ha/yr	30%
	ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้							
3	อินทรียวัตถุในดิน	5.96E+09	J/ha/yr	2.25E+05	sej/J	1.34E+15	sej/ha/yr	17%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	ขั้นการปลูก:							
4	เมล็ด	168.00	kg/ha/yr	2.77E+11	sej/kg	4.65E+13	sej/ha/yr	1%
	ปุ๋ย:							
5	ไนโตรเจน, N	119.85	kg/ha/yr	6.38E+12	sej/kg	7.65E+14	sej/ha/yr	10%
6	ฟอสฟอรัส, P_2O_5	0.80	kg/ha/yr	6.55E+12	sej/kg	5.26E+12	sej/ha/yr	0%
7	โพแทสเซียม, K_2O	60.26	kg/ha/yr	1.85E+12	sej/kg	1.11E+14	sej/ha/yr	1%
	ยาฆ่าแมลง:							
8	ไกลโฟเสต	4.76	kg/ha/yr	2.48E+13	sej/kg	8.01E+13	sej/ha/yr	1%
9	พาราควอต	1.70	kg/ha/yr	2.48E+13	sej/kg	8.01E+13	sej/ha/yr	1%
10	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	162.81	kg/ha/yr	2.48E+13	sej/kg	7.49E+14	sej/ha/yr	10%

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 2 4 5 และ 6 (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
11	ค่าแรง	341.57	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.26E+15	sej/ha/yr	16%
12	ค่าจ้างอื่นๆ	145.35	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.38E+14	sej/ha/yr	7%
13	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	24.22	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	8.96E+13	sej/ha/yr	1%
	ขั้นการหีบน้ำมัน:							
14	ไฟฟ้า	1.57E+08	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	5.28E+13	sej/ha/yr	1%
15	น้ำมันดีเซล	2.67	kg/ha/yr	1.10E+05	sej/J	1.23E+13	sej/ha/yr	0%
16	น้ำ	14.56	kg/ha/yr	2.03E+05	sej/g	2.96E+09	sej/ha/yr	0%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
17	ค่าแรง	30.201	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.12E+14	sej/ha/yr	1%
18	ค่าจ้างอื่นๆ	50.352	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.86E+14	sej/ha/yr	2%
19	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	45.740	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.69E+14	sej/ha/yr	2%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)[ก]					2.36E+15	sej/ha/yr	30%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S)[ก]					5.57E+15	sej/ha/yr	70%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นการปลูก (รวม L&S)[ก]					7.92E+15	sej/ha/yr	100%

[ก] L&S คือแรงงานและค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 1

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	น้ำมันปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	1.21E+11	J/ha/yr	6.52E+04	sej/J	7.92E+15	sej/ha/yr	60%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
2	เมทานอล	424.37	kg/ha/yr	7.23E+09	sej/g	3.07E+15	sej /ha/yr	23%
3	ตัวเร่งปฏิกิริยา (KOH)	3.46	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.28E+13	sej /ha/yr	0%
4	เรซิน	107.33	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	3.97E+14	sej /ha/yr	3%
5	ไฟฟ้า	4.58E+08	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	1.54E+14	sej /ha/yr	1%
6	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	1.10E+05	J/ha/yr	1.10E+05	sej/J	5.71E+14	sej /ha/yr	4%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
7	ค่าแรง	135.03	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.00E+14	sej /ha/yr	4%
8	ค่าจ้างอื่นๆ	149.42	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.53E+14	sej /ha/yr	4%
9	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	17.86	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	6.61E+13	sej/ha/yr	0%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					3.48E+15	sej/ha/yr	26%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)					9.77E+15	sej/ha/yr	74%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (รวม L&S)					1.32E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 1 2 4 5 และ 6

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
น้ำมันปาล์ม	3026	kg/ha/yr	1.21E+11	J/ha/yr
กากเหลือ (Residues)				
เนื้อเมล็ด	935	kg/ha/yr	1.59E+10	J/ha/yr
เปลือก	935	kg/ha/yr	1.73E+10	J/ha/yr
กากปาล์ม	2,380	kg/ha/yr	2.19E+10	J/ha/yr
ทะลายเปล่า	3,910	kg/ha/yr	3.91E+10	J/ha/yr
รวมกากเหลือ	8,160	kg/ha/yr	9.42E+10	J/ha/yr
รวมชีวมวลปาล์ม	11,186	kg/ha/yr	2.16E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)			6.52E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)			4.58E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)			2.62E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)			1.84E+12	sej/kg
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (รวม L&S)			3.67E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (ไม่รวม L&S)			2.58E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของชีวมวลปาล์ม (รวม L&S)			7.08E+11	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของชีวมวลปาล์ม (ไม่รวม L&S)			4.98E+11	sej/kg

ตารางที่ 4.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 1

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
ไบโอดีเซล	2,436.19	kg/ha/yr	9.27E+10	J/ha/yr
กลีเซอรอล	438.51	kg/ha/yr	8.33E+09	J/ha/yr
รวม	2,874.70	kg/ha/yr	1.01E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)			1.43E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			1.05E+05	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (รวม L&S)			5.44E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			4.01E+12	sej/kg

ตารางที่ 4.6 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 1

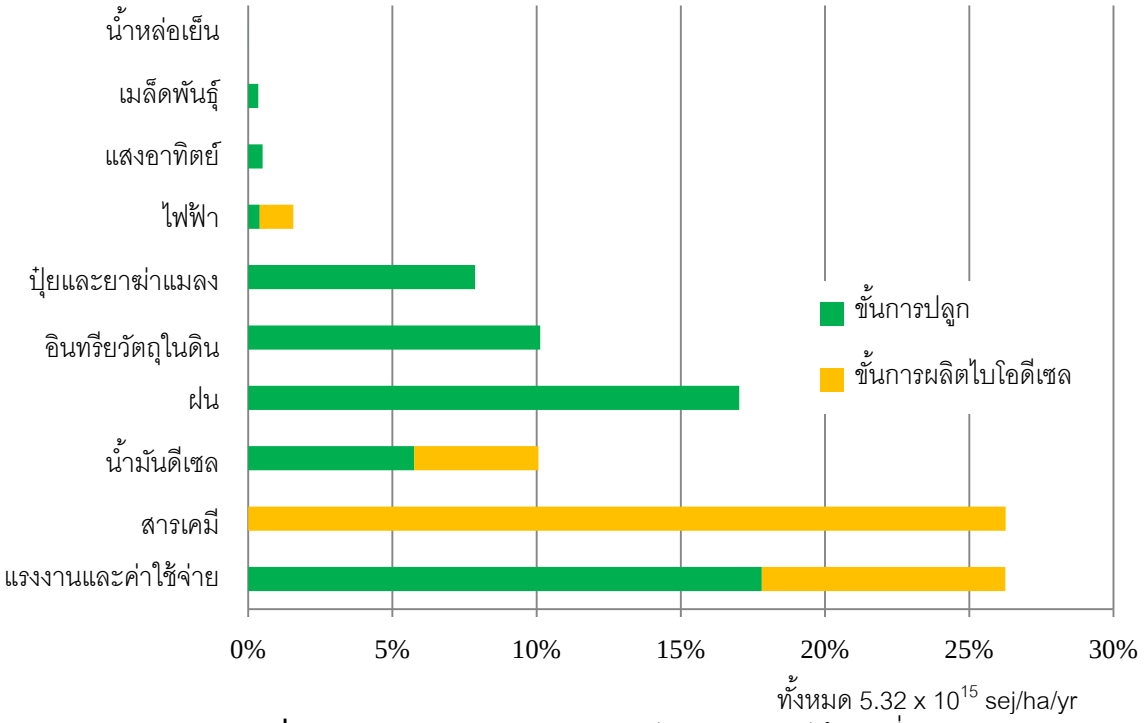
รายการ	ปริมาณ (sej/ha/yr) ทั้งหมด	R[ก]	N[ก]
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.90E+15		1.90E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A[ข]	2.36E+15	2.44E+14	2.11E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		2.57E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			5.36E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	7.92E+15		
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	4.20E+15		4.20E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	1.12E+15	1.16E+14	1.00E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		1.16E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			5.21E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	5.32E+15		

[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

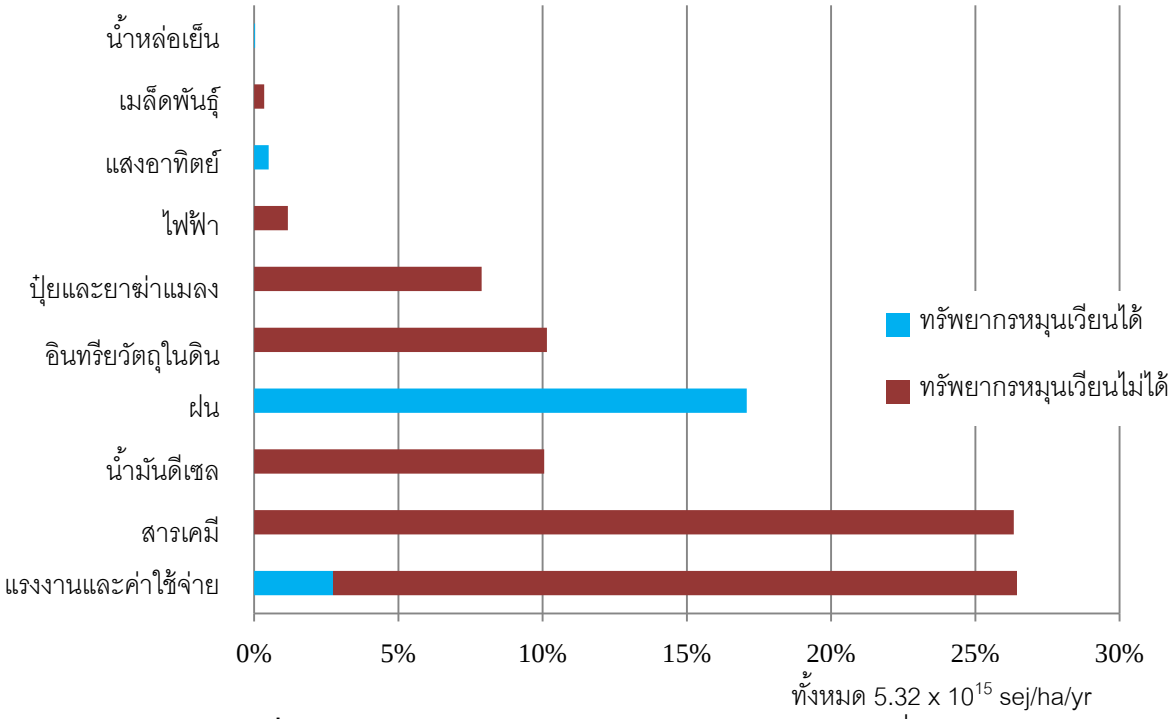
[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

ตารางที่ 4.7 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 1

รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งหมด
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	6.11E+15	46%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	3.48E+15	26%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	2.68E+15	20%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.05E+16	80%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.32E+16	



ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.8 ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 1

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)	6.52E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)	4.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	2.07	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.89	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	1.43E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	1.05E+05	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.38	
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	3.94	
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.35	

4.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดอุตสาหกรรม

ในกรณีที่ 2 นี้จะศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในระบบขนาดอุตสาหกรรม ซึ่งมีสมมุติฐานให้ขั้นการปลูกของกรณีศึกษาที่ 2 นี้และกรณีศึกษาที่ 1 มีข้อมูลมาจากแหล่งเดียวกัน ทั้งสองกรณีจึงต่างกันที่ขั้นการผลิตไบโอดีเซล ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซล จะพบว่าในระบบขนาดอุตสาหกรรมซึ่งมีการหมุนเวียนเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าระบบขนาดต้นแบบ ทำให้มีปริมาณเมทานอลที่ถูกใช้ไปต่ำกว่า นอกจากนี้ระบบขนาดต้นแบบซึ่งมีขนาดเล็กสามารถควบคุมอุณหภูมิด้วยไฟฟ้าอย่างเดียวก็เพียงพอ ในขณะที่ระบบขนาดอุตสาหกรรมซึ่งขนาดใหญ่จึงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวได้ จำเป็นจะต้องใช้ไอน้ำและน้ำหล่อเย็นเข้ามาควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ ข้อมูลจากแหล่งที่มานี้ไม่ได้กล่าวถึงวิธีการผลิตไอน้ำที่นำมาใช้ในระบบ แต่บอกมาเป็นปริมาณไอน้ำที่ต้องการ ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะใช้ถ่านหินหรือแก๊สธรรมชาติมาเผาและผลิตไอน้ำใช้ในระบบ การคำนวณเอเมอร์จีในส่วนนี้จึงจำเป็นต้องสมมุติให้ไอน้ำในกระบวนการนี้ผลิตจากแก๊สธรรมชาติซึ่งจะมีค่าทรานส์

ฟอร์มิดีเท่ากับ 1.30 x 10^9 sej/g [34] ซึ่งหากกระบวนการผลิตไอน้ำต่างกันจะมีทรานส์ฟอร์มิดีของไอน้ำไม่เท่ากัน ปริมาณเอเมอร์จีที่ใช้ในระบบขนาดอุตสาหกรรมนี้หลักจะอยู่ที่แรงงานและค่าใช้จ่ายซึ่งคิดเป็นร้อยละ 23 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ และสำคัญรองลงมาคือไอน้ำคิดเป็นร้อยละ 19 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ และเมทานอลคิดเป็นร้อยละ 15 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ

ระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรมระบบนี้มีการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ด้วยการล้างด้วยน้ำ และกำจัดน้ำในภายหลัง ซึ่งต่างจากระบบขนาดต้นแบบในกรณีศึกษาที่ 1 ที่ใช้การแยกด้วยเรซิน

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.12 พบว่าปริมาณเอเมอร์จีของทรัพยากรที่ไม่สามารถหมุนเวียนถูกใช้ไปร้อยละ 82 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ โดยการกระจายตัวของทรัพยากร ในระบบทั้งส่วนที่หมุนเวียนได้และส่วนที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้แสดงในภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.13 แสดงตัวชี้วัดความยั่งยืนของระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรม โดย นี้ได้ตั้งสมมุติฐานให้ข้อมูลของขั้นการปลูกของกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 มาจากแหล่งเดียวกัน ดังนั้นดัชนีความยั่งยืนต่าง ๆ ของน้ำมันปาล์มที่ได้จากขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 2 นี้มีค่าเท่ากับในกรณีศึกษาที่ 1 ส่วนขั้นการผลิตไบโอดีเซลมีผลได้ของเอเมอร์จีเท่ากับ 1.33 ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของระบบในการสร้างผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าที่มากกว่า 1 หมายถึงระบบสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณมากกว่าเอเมอร์จีที่ป้อนให้แก่ระบบ หากค่านี้น้อยกว่า 1 หมายถึงระบบจำเป็นต้องดึงเอเมอร์จีจากภายนอกระบบมาปริมาณมาก และประพฤติตัวเป็นผู้รับมากกว่าผู้สร้าง ค่าสัดส่วนภาระต่อสิ่งแวดล้อมหรือ ELR ของการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 4.47 ซึ่งหมายถึงการจะได้ไบโอดีเซลจะต้องใช้ทรัพยากรหมุนเวียนไม่ได้สูงกว่าทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ถึงสี่เท่า ระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรมนี้มีดัชนีความยั่งยืนเท่ากับ 0.3

ตารางที่ 4.9 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 2

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	น้ำมันปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	1.21E+11	J/ha/yr	6.52E+04	sej/J	7.92E+15	sej/ha/yr	54%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	สารเคมี:							
2	เมทานอล	303.95	kg/ha/yr	7.23E+09	sej/g	2.17E+15	sej/ha/yr	15%
3	ตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH)	3.13	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/g	1.97E+13	sej/ha/yr	0%
4	ไอน้ำ	2130.77	kg/ha/yr	1.30E+09	sej/g	2.73E+15	sej/ha/yr	19%
5	น้ำหล่อเย็น	1.25E+04	kg/ha/yr	6.64E+05	sej/g	8.21E+12	sej/ha/yr	0%
6	ไฟฟ้า	2.93E+08	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	9.72E+13	sej/ha/yr	1%
7	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	5.11E+09	J/ha/yr	1.10E+05	sej/J	5.61E+14	sej/ha/yr	4%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
8	ค่าแรง	69.25	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	2.56E+14	sej/ha/yr	2%
9	ค่าจ้างอื่นๆ	123.32	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	4.56E+14	sej/ha/yr	3%
10	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	95.81	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	3.54E+14	sej/ha/yr	2%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					3.43E+15	sej/ha/yr	24%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)					1.12E+16	sej/ha/yr	76%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (รวม L&S)					1.46E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.10 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 2

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
ไบโอดีเซล	2809.50	kg/ha/yr	1.07E+11	J/ha/yr
กลีเซอรอล	505.71	kg/ha/yr	9.61E+09	J/ha/yr
รวม	3315.21	kg/ha/yr	1.17E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)			1.36E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			1.04E+05	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (รวม L&S)			5.19E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			3.97E+12	sej/kg

ตารางที่ 4.11 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 2

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	$R^{ก}$	$N^{ก}$
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.90E+15		1.85E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A[ข]	2.36E+15	2.44E+14	2.11E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		2.57E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			5.32E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	7.92E+15		
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	5.59E+15		5.59E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	1.07E+15	1.10E+14	9.57E+14
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		1.10E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			6.54E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	6.65E+15		

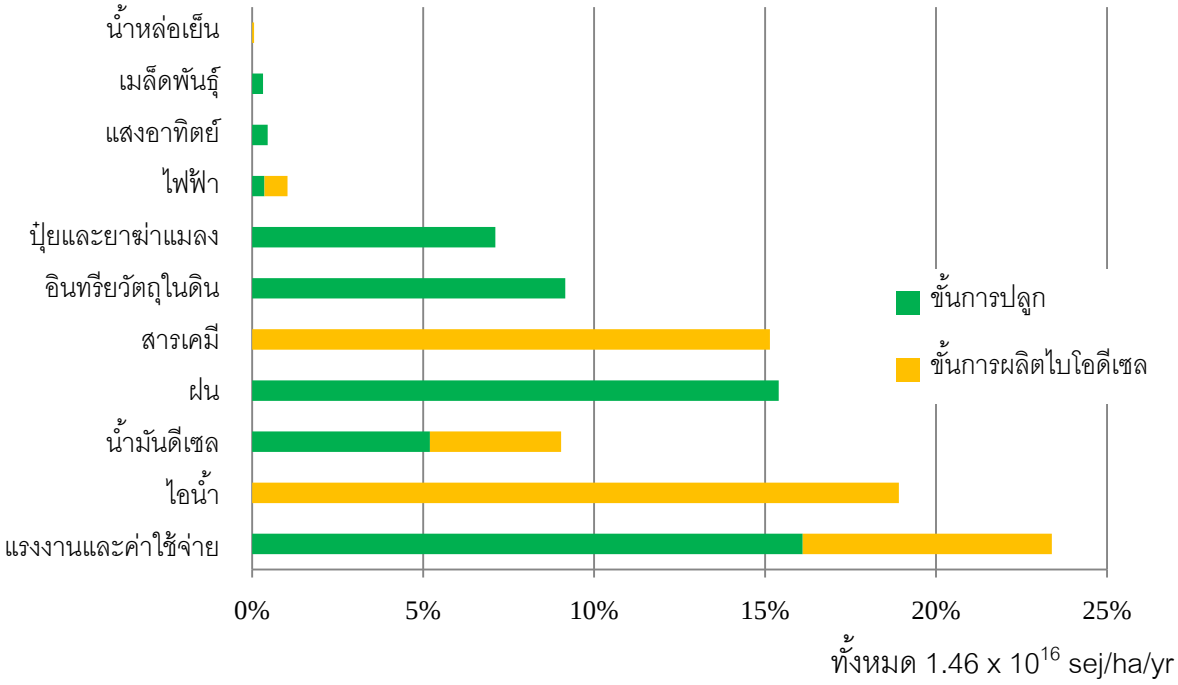
[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

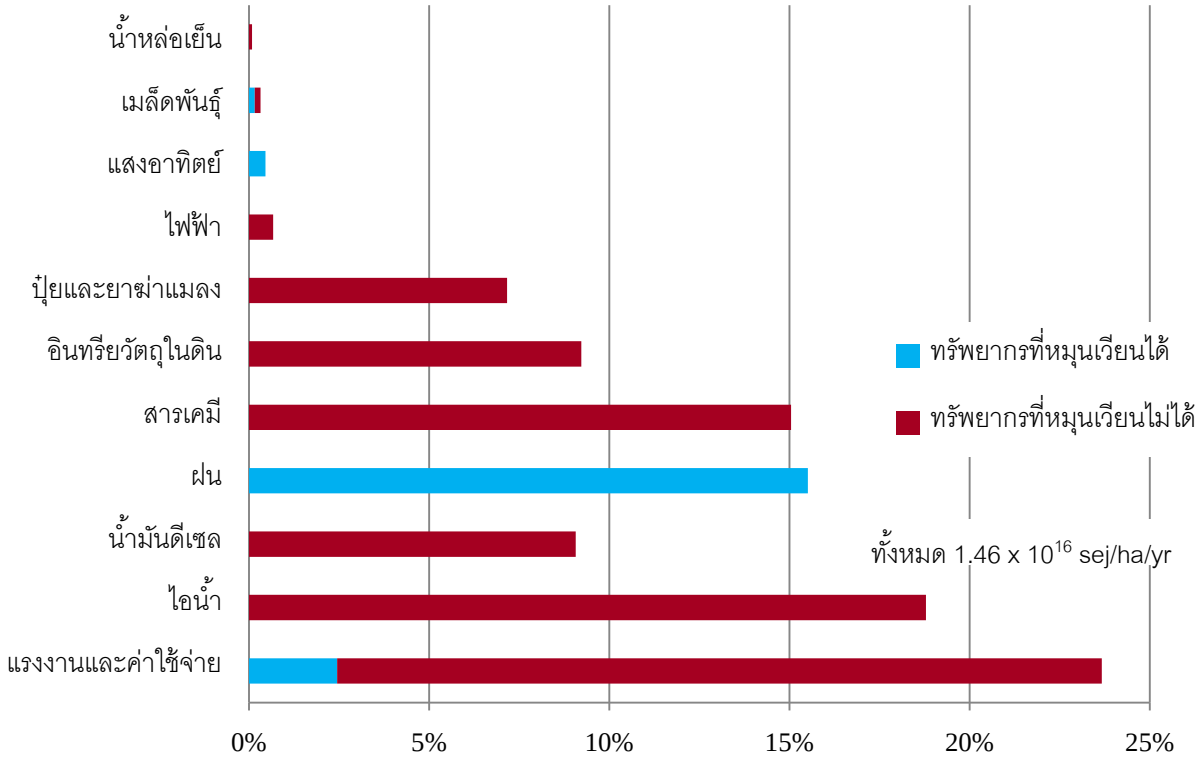
ตารางที่ 4.12 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 2

รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งหมด
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	7.49E+15	51%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	3.43E+15	24%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	2.68E+15	18%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.19E+16	82%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.46E+16	

ภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 2



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 2



ตารางที่ 4.13 ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 2

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)	5.18E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)	3.64E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	2.09	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.89	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	1.36E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	1.04E+05	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.34	
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	4.43	
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.30	

4.1.3 กรณีศึกษาที่ 3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำขนาดต้นแบบ

ปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการแสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.16 โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นหลักคือ ขั้นการปลูก และขั้นการผลิตไบโอดีเซล เช่นเดียวกับในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันปาล์มในแต่ละขั้นจะมีส่วนประกอบย่อยอยู่ภายใน ได้แก่ ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้ ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้ ทรัพยากรนำเข้า แรงงานและค่าใช้จ่าย ขั้นตอนการคำนวณเอเมอร์จีของแต่ละสายแสดงไว้ในส่วนภาคผนวก

จากตารางที่ 4.14 เอเมอร์จีที่ไหลในขั้นการปลูกแต่ละสาย ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้ (Local renewable resources, R_L) ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณน้ำฝน คิดเป็นปริมาณเอเมอร์จี 2.32 x 10^{15} sej/ha/yr หรือร้อยละ 15 ของเอเมอร์จีในขั้นการปลูก และทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้ (Local non-renewable resources, N_L) ได้แก่ อินทรียวัตถุในดินปริมาณ 1.34 x 10^{15} sej/ha/yr คิดเป็นร้อยละ 9

จะพบว่าปริมาณทรัพยากรในระบบที่ถูกใช้คิดเป็น ร้อยละ 24 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก เนื่องจากสบู่ดำเป็นพืชที่ทนต่อสภาพอากาศแห้งแล้ง ทำให้ปริมาณน้ำฝนเพียงพอต่อการปลูกสบู่ดำโดยไม่ต้องรดน้ำเพิ่ม แต่ปุ๋ยจำเป็นต้องใส่เพิ่มเพื่อให้ได้ผลผลิตตามต้องการ ข้อมูลของสบู่ดำในกรณีนี้ไม่มีการนำกากเหลือหลังจากการหีบน้ำมันมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ ปริมาณการใช้ปุ๋ยจึงค่อนข้างสูง และเนื่องจากสบู่ดำได้ผลผลิตปริมาณน้อย (ปาล์มน้ำมันได้ผลผลิต 17 ตันต่อเฮคแทร์ต่อปี ส่วนสบู่ดำได้ผลผลิต 8.75 ตันต่อเฮคแทร์ต่อปี) จึงจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการเก็บเกี่ยวจำนวนมาก เอเมอร์จีในส่วนแรงงานและค่าใช้จ่ายสูงถึง เอเมอร์จีในส่วน แรงงานและค่าใช้จ่าย นี้สูงถึงร้อยละ 54 หรือครึ่งหนึ่งของเอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูกและถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญของระบบ

ค่าทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันสบู่ดำแบบที่รวมเอเมอร์จีของแรงงานและค่าใช้จ่ายและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีของแรงงานและค่าใช้จ่ายมีค่าเท่ากับ 1.92 x 10^5 sej/j และ 8.90 x 10^4 sej/j ตามลำดับ ส่วนทรานส์ฟอร์มิตีที่รวมและไม่รวมค่าแรงและค่าใช้จ่ายของชีวมวล สบู่ดำมีค่าเท่ากับ 7.55 x 10^4 sej/j และ 3.49 x 10^4 sej/j ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 แสดงเอเมอร์จีที่ไหลในขั้นการผลิตไบโอดีเซลแต่ละสาย ในขั้นนี้เอเมอร์จีจะได้มาจากทรัพยากรภายนอกระบบทั้งหมดซึ่งได้แก่ น้ำมัน สบู่ดำจากขั้นแรก สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาในที่นี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์)

และสารเคมีที่ใช้แยกผลิตภัณฑ์ (เรซิน) เอเมอร์จีปริมาณมากในขั้นนี้มาจากเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายซึ่งรวมกับในขั้นตอนปลูกแล้วคิดเป็น ร้อยละ 46 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ สูงเกือบครึ่งหนึ่งของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ รองลงมาคือ เมทานอลที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คิดเป็นร้อยละ 15 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ เมทานอลถูกใช้ไปปริมาณมากเนื่องจากในระบบขนาดต้นแบบนี้ไม่มีการหมุนเวียนสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่

ระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบนี้ใช้เอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายรวมร้อยละ 46 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไบโอดีเซลและกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง มีค่าทรานส์ฟอร์มิตีที่รวมและไม่รวมค่าแรงและค่าใช้จ่ายของไบโอดีเซลเท่ากับ 2.08×10^5 sej/j และ 1.52×10^5 sej/j ตามลำดับ จะพบว่าทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันสบู่ดำและไบโอดีเซลจากสบู่ดำแบบที่ รวมเอเมอร์จีของแรงงานและค่าใช้จ่าย มีค่าสูงกว่า แบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีของ แรงงานและ ค่าใช้จ่าย ถึงสองเท่า ดังที่กล่าวไปแล้วว่าค่าแรงและค่าใช้จ่ายซึ่งคิดเป็นปริมาณเงินมีความผันผวนค่อนข้างมาก การแยกวิเคราะห์เอเมอร์จีของระบบที่ไม่รวมส่วนนี้จะช่วยให้ทราบความเปลี่ยนแปลงเมื่อเศรษฐกิจผกผัน

แหล่งทรัพยากรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในระบบออกเป็น 4 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้ (R_L) ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้ (N_L) ทรัพยากรนำเข้า (F) แรงงานและค่าใช้จ่าย (S) สรุปได้ดังตารางที่ 4.18 และ 4.19 โดยจะพบว่าเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่าย มีค่าสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 46 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบร้อยละ 40 ที่ได้มาจากขั้นการปลูก เนื่องจากสบู่ดำมีผลผลิตค่อนข้างต่ำ และจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการเก็บเกี่ยวสูง

ตารางที่ 4.14 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
	ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้							
1	พลังงานแสงอาทิตย์	6.64E+13	J/ha/yr	1	sej/J	6.64E+13	sej/ha/yr	0%
2	พลังงานฝน	7.37E+10	J/ha/yr	3.06E+04	sej/J	2.26E+15	sej/ha/yr	15%
	รวมส่วนที่หมุนเวียนได้					2.32E+15	sej/ha/yr	15%
	ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้							
3	อินทรียวัตถุในดิน	5.96E+09	J/ha/yr	2.25E+05	sej/J	1.34E+15	sej/ha/yr	9%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	ขั้นการปลูก:							
4	เมล็ด	825	kg/ha/yr	5.95E+11	sej/kg	6.36E+14	sej/ha/yr	4%
	ปุ๋ย:							
5	ไนโตรเจน, N	104.2	kg/ha/yr	6.38E+12	sej/kg	6.65E+14	sej/ha/yr	4%
6	ฟอสฟอรัส, P_2O_5	104.2	kg/ha/yr	6.55E+12	sej/kg	6.82E+14	sej/ha/yr	4%
7	โพแทสเซียม, K_2O	104.2	kg/ha/yr	1.85E+12	sej/kg	1.93E+14	sej/ha/yr	1%
	ยาฆ่าแมลง:							
8	ไกลโฟเสต	0.0014	kg/ha/yr	2.48E+13	sej/kg	2.47E+10	sej/ha/yr	0%
9	พาราควอต	0.00055	kg/ha/yr	2.48E+13	sej/kg	2.47E+10	sej/ha/yr	0%
10	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	84.54	kg/ha/yr	2.48E+13	sej/kg	3.94E+14	sej/ha/yr	3%

ตารางที่ 4.14 ปริมาณเอเมอร์จีของขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3 (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
11	ค่าแรง	2055.56	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	7.61E+15	sej/ha/yr	50%
12	ค่าจ้างอื่นๆ	146.25	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.41E+14	sej/ha/yr	4%
13	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	24.37	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	9.02E+13	sej/ha/yr	1%
	ขั้นการหีบน้ำมัน:							
14	ไฟฟ้า	2.41E+09	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	8.10E+14	sej/ha/yr	5%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
15	ค่าแรง	0.134	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	4.96E+11	sej/ha/yr	0%
16	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	0.17	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.92E+12	sej/ha/yr	0%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					8.24E+15	sej/ha/yr	54%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S)					7.09E+15	sej/ha/yr	46%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นการปลูก (รวม L&S)					1.53E+16	sej/ha/yr	100%

[ก] L&S คือแรงงานและค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 4.15 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 3

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	น้ำมันสบู่ดำจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	7.97E+10	J/ha/yr	6.52E+04	sej/J	1.53E+16	sej/ha/yr	75%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	สารเคมี:							
2	เมทานอล	416.48	kg/ha/yr	7.23E+09	sej/g	3.01E+15	sej/ha/yr	15%
3	ตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH)	18.30	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/g	1.17E+14	sej/ha/yr	1%
4	เรซิน	71.38	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	2.64E+14	sej/ha/yr	1%
5	ไฟฟ้า	4.12E+08	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	1.38E+14	sej/ha/yr	1%
6	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	3.83E+09	kg/ha/yr	1.10E+05	sej/J	4.21E+14	sej/ha/yr	2%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
7	ค่าแรง	91.05	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.00E+14	sej/ha/yr	2%
8	ค่าจ้างอื่นๆ	100.76	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.53E+14	sej/ha/yr	3%
9	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	12.04	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	6.61E+13	sej/ha/yr	0%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					9.36E+15	sej/ha/yr	46%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)					1.10E+16	sej/ha/yr	54%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (รวม L&S)					2.04E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.16 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการปลูกในกรณีศึกษาที่ 3

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
น้ำมันสบู่ดำ	2012.50	kg/ha/yr	7.97E+10	J/ha/yr
กากเหลือ (Residues)				
เนื้อเมล็ด	6562.5	kg/ha/yr	1.23E+11	J/ha/yr
รวมชีวมวลสบู่ดำ	8575.00	kg/ha/yr	2.03E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันสบู่ดำ (รวม L&S)			1.92E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันสบู่ดำ (ไม่รวม L&S)			8.90E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของน้ำมันสบู่ดำ (รวม L&S)			7.62E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของน้ำมันสบู่ดำ (ไม่รวม L&S)			3.52E+12	sej/kg
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลสบู่ดำ (รวม L&S)			7.55E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลสบู่ดำ (ไม่รวม L&S)			3.49E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของชีวมวลสบู่ดำ (รวม L&S)			1.79E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของชีวมวลสบู่ดำ (ไม่รวม L&S)			8.27E+11	sej/kg

ตารางที่ 4.17 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 3

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
ไบโอดีเซล	1911.88	kg/ha/yr	7.28E+10	J/ha/yr
กลีเซอรอล	412.56	kg/ha/yr	7.84E+09	J/ha/yr
รวม	2324.44	kg/ha/yr	8.06E+10	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)			2.80E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			1.52E+05	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (รวม L&S)			1.06E+13	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			5.70E+12	sej/kg

ตารางที่ 4.18 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 3

รายการ	ปริมาณ (sej/ha/yr) ทั้งหมด	$R^{ก}$	$N^{ก}$
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	3.28E+15		3.28E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A [ข]	8.24E+15	8.51E+14	7.39E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		3.17E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			1.20E+16
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	1.52E+16		
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	3.95E+15		3.95E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	1.12E+15	1.16E+14	1.00E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		1.16E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			4.95E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	5.07E+15		

[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

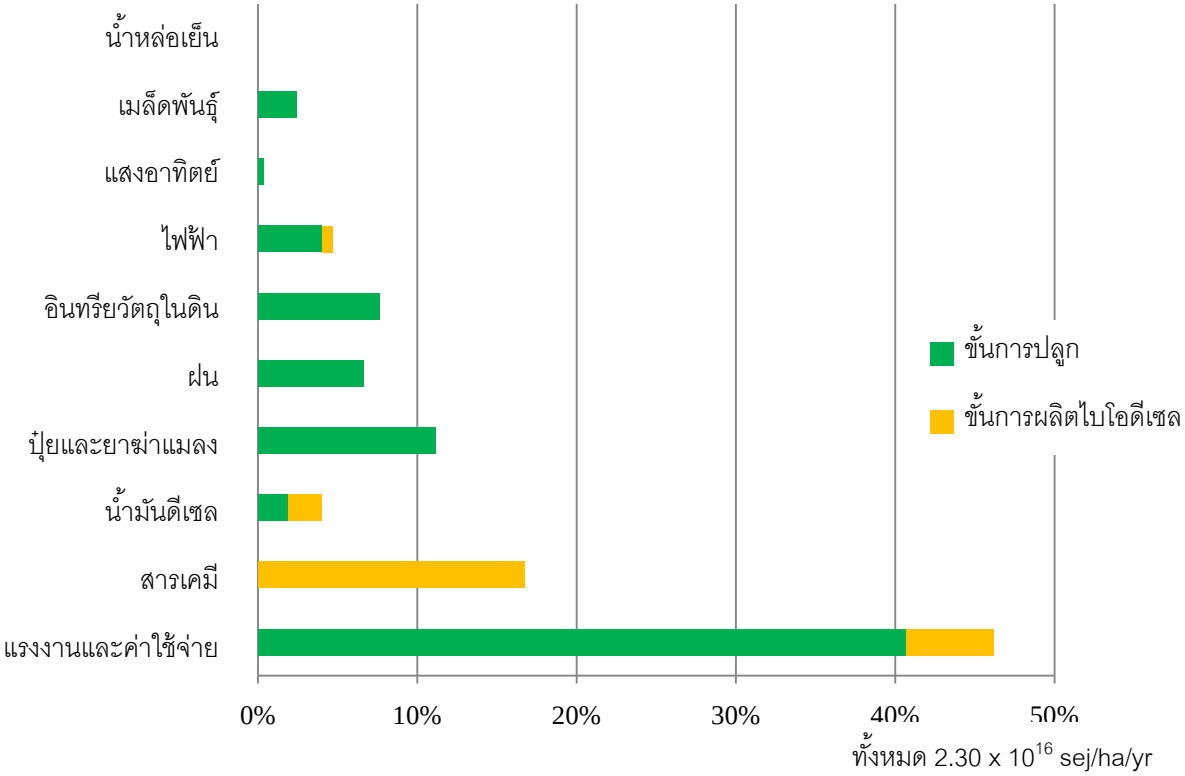
[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

ตารางที่ 4.19 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 3

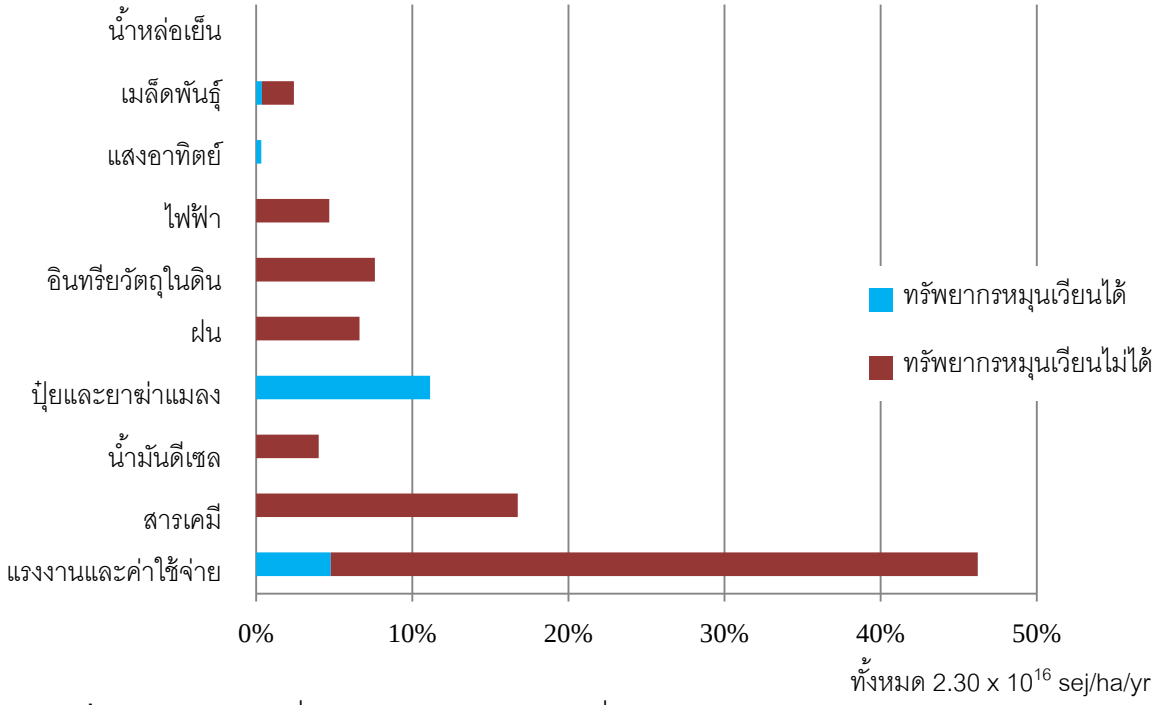
รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งระบบ
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	7.23E+15	36%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	9.36E+15	46%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	3.29E+15	16%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.70E+16	84%

รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	2.02E+16

ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 3



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 3



ตารางที่ 4.20 ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 3

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันสบู่ดำ (รวม L&S)	7.47E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันสบู่ดำ (ไม่รวม L&S)	3.42E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.32	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	3.78	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.35	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	2.51E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	1.35E+05	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.22	

ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	5.16
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.24

ระบบนี้ใช้ทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้สูงถึง ร้อยละ 84 ซึ่งส่วนใหญ่มาจากส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้ในแรงงานและค่าใช้จ่าย และเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ตารางที่ 4.20 แสดงตัวชี้วัดความยั่งยืนของระบบผลิตไบโอดีเซล ด้วยน้ำมันสบู่ดำขนาดต้นแบบ โดยน้ำมันสบู่ดำที่ได้จากขั้นการปลูกมีผลได้ของเอเมอร์จีเท่ากับ 1.32 หมายถึงระบบสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณมากกว่าเอเมอร์จีที่ป้อนให้แก่ระบบ ร้อยละ 32 ค่าสัดส่วนภาระต่อสิ่งแวดล้อมหรือ ELR ของน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 3.78 ซึ่งหมายถึงการจะได้น้ำมันปาล์มจะต้องใช้ทรัพยากรหมุนเวียนไม่ได้สูงกว่าทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ถึงเกือบสี่เท่า และดัชนีความยั่งยืนหรือ ESI ของขั้นการปลูกเท่ากับ 0.35 ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ที่เป็นระบบของปาล์มน้ำมัน ค่าที่ต่ำในขั้นการปลูกนี้จะส่งผลให้ค่าความยั่งยืนของการผลิตไบโอดีเซลต่ำไปด้วย จะพบว่าค่า ESI ของไบโอดีเซลอยู่ที่ 0.24 ซึ่งแสดงว่าประสิทธิภาพของระบบค่อนข้างต่ำและยังสร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อมสูง

4.2 เปรียบเทียบผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย

ในส่วนนี้จะทำการ เปรียบเทียบผลที่ได้จากการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยทั้ง 3 กรณีศึกษา ซึ่งได้แก่

กรณีศึกษาที่ 1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบ

กรณีศึกษาที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดอุตสาหกรรม

กรณีศึกษาที่ 3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำขนาดต้นแบบ

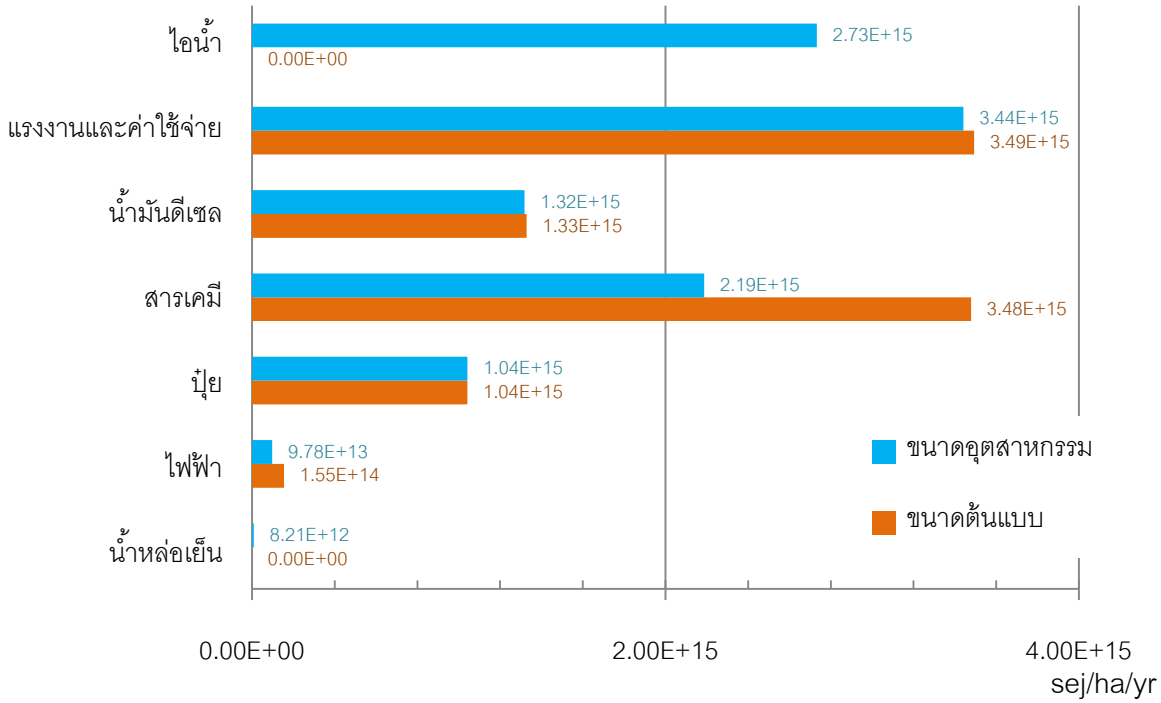
4.2.1 เปรียบเทียบผลของขนาดกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ภาพที่ 4.7 แสดงผลเปรียบเทียบเอเมอร์จีในระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบ (สีฟ้า) และขนาดอุตสาหกรรม (สีส้ม) เอเมอร์จีแต่ละส่วนแสดงในหน่วย sej/ha/yr หรือโซลาร์เอ็มจูลต่อเฮคแทร์ต่อปี ผลการเปรียบเทียบพบว่าระบบขนาดอุตสาหกรรมมีการใช้เอเมอร์จีจากไอน้ำปริมาณมาก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าเนื่องจากระบบขนาดอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้ไอน้ำและน้ำหล่อเย็นในการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบขนาดต้นแบบซึ่งมีขนาดเล็กกว่า สามารถ

ใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวในการควบคุมอุณหภูมิได้ ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 4.7 ว่าเอเมอร์จีของไฟฟ้าในระบบขนาดต้นแบบมีการใช้ไฟฟ้าสูงกว่าในระบบอุตสาหกรรม แต่ในระบบขนาดต้นแบบมีการใช้สารเคมี (เมทานอล) ในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า ซึ่งในระบบขนาดอุตสาหกรรมมีระบบหมุนเวียนสารตั้งต้นกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า ทำให้ใช้สารเคมีต่ำกว่า ในส่วนของต้นทุนในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากระบบอุตสาหกรรมมีกำลังการผลิตสูงกว่าและมีกระบวนการควบคุมที่ดีกว่า จึงสามารถลดเอเมอร์จีส่วนแรงงานและค่าใช้จ่ายลงได้เล็กน้อย

ตารางที่ 4.21 แสดงแสดงผลเปรียบเทียบดัชนีความยั่งยืนในระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบและขนาดอุตสาหกรรม พบว่าทรานส์ฟอร์มิตีแบบรวมเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายของระบบขนาดต้นแบบสูงกว่าระบบขนาดอุตสาหกรรมเพียงร้อยละ 5 เนื่องจากระบบขนาดต้นแบบใช้ปริมาณเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบขนาดอุตสาหกรรมเล็กน้อย และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบขนาดต้นแบบต่ำกว่าระบบขนาดอุตสาหกรรมประมาณ 1.15 เท่า ทำให้ในการผลิตไบโอดีเซล 1 จูล ระบบขนาดอุตสาหกรรมใช้ปริมาณเอเมอร์จีต่ำกว่าระบบขนาดต้นแบบ และเนื่องจากปริมาณไอน้ำที่ถูกใช้ไปปริมาณมากในระบบขนาดอุตสาหกรรมทำให้สร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อม (ELR) ค่อนข้างสูง คิดเป็นดัชนีเท่ากับ 4.43 สูงกว่าระบบขนาดต้นแบบซึ่งคิดเป็น 3.92 ทำให้ค่าดัชนีความยั่งยืน (ESI) ของระบบขนาดอุตสาหกรรมต่ำกว่าระบบขนาดต้นแบบ 1.17 เท่า

ภาพที่ 4.7 ผลของขนาดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อการกระจายตัวของเอเมอร์จี



ตารางที่ 4.21 ผลของขนาดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อดัชนีความยั่งยืนของระบบ

รายการ	หน่วย	ขนาดต้นแบบ	ขนาดอุตสาหกรรม
รวมทั้งระบบ			
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	sej/ha/yr	6.11E+15	7.56E+15
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	sej/ha/yr	3.48E+15	3.43E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	sej/ha/yr	2.68E+15	2.68E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	sej/ha/yr	1.06E+16	1.20E+16
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	sej/ha/yr	1.32E+16	1.46E+16
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	sej/J	1.43E+05	1.35E+05
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	sej/J	1.05E+05	1.03E+05
EYR ของไบโอดีเซล = $Y_T / (F_T + S_T)$		1.38	1.33
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T		3.94	4.47
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR		0.35	0.30

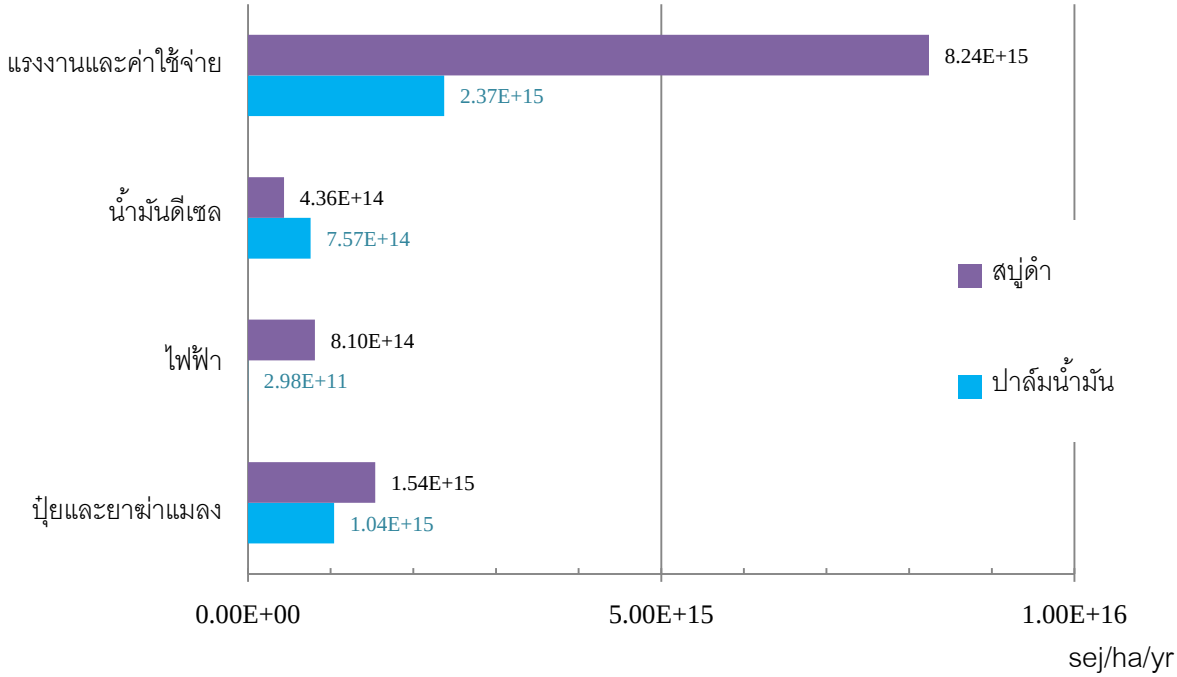
4.2.2 เปรียบเทียบผลของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันปาล์มและน้ำมันสบู่ดำมีการใช้ทรัพยากรต่างๆในขั้นการปลูกแตกต่างกัน ส่วนขั้นการผลิตไบโอดีเซลเป็นข้อมูลจากเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงไม่แตกต่างกันมากนัก โดยระบบปาล์มน้ำมันมีการใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าเมทานอลที่ใช้ในระบบสบู่ดำเล็กน้อย ซึ่งมีผลจากองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากขั้นการปลูก และการควบคุมขั้นตอนการผลิต

ภาพที่ 4.8 แสดงผลเปรียบเทียบการกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการปลูกระหว่างการใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลกับการใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล จะพบว่าในขั้นการปลูกนี้ระบบสบู่ดำมีการใช้เอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายไปสูงมาก เนื่องจากผลผลิตของสบู่ดำที่ได้ค่อนข้างต่ำ ปริมาณปุ๋ยในระบบปาล์มน้ำมันมีการนำกากเหลือรวมถึงทะลายปาล์มจำนวนมากที่ได้จากการหีบน้ำมันกลับมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ ทำให้ปริมาณเอเมอร์จีจากปุ๋ยในระบบปาล์มน้ำมันต่ำกว่าระบบสบู่ดำ ซึ่งตามทฤษฎีหากทั้งสองระบบไม่มีการนำกากเหลือกลับมาใช้ปาล์มน้ำมันจะต้องการปริมาณปุ๋ยมากกว่าสบู่ดำ

ตารางที่ 4.22 แสดงผลเปรียบเทียบดัชนีความยั่งยืนในระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและระบบผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำ พบว่าทรานส์ฟอร์มิตีของระบบสบู่ดำสูงกว่าระบบปาล์มน้ำมันถึง 1.8 เท่า เนื่องจากระบบสบู่ดำใช้ปริมาณเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบปาล์มน้ำมันและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบสบู่ดำต่ำกว่าระบบปาล์มน้ำมัน 1.27 เท่า ทำให้ในการผลิตไบโอดีเซล 1 จูล ระบบปาล์มน้ำมันใช้ปริมาณเอเมอร์จีต่ำกว่าระบบสบู่ดำ และเนื่องจากระบบสบู่ดำใช้เอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายไปปริมาณมากทำให้ใช้ปริมาณทรัพยากรหมุนเวียนไม่ได้สูงไปด้วย สร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อม (ELR) คิดเป็นดัชนีเท่ากับ 5.16 สูงกว่าระบบปาล์มน้ำมันซึ่งมีค่า 3.92 ทำให้ค่าดัชนีความยั่งยืน (ESI) ของระบบสบู่ดำต่ำกว่าระบบปาล์มน้ำมันถึง 1.45 เท่า

ภาพที่ 4.8 ผลของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลต่อการกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการปลูก



ตารางที่ 4.22 ผลของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลต่อดัชนีความยั่งยืนของระบบ

รายการ	หน่วย	ปาล์มน้ำมัน	สบู่ดำ
รวมทั้งระบบ			
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	sej/ha/yr	6.11E+15	7.23E+15
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	sej/ha/yr	3.48E+15	9.36E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	sej/ha/yr	2.68E+15	3.29E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	sej/ha/yr	1.06E+16	1.70E+16
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	sej/ha/yr	1.32E+16	2.02E+16
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	sej/J	1.43E+05	2.51E+05
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	sej/J	1.05E+05	1.35E+05
EYR ของไบโอดีเซล = $Y_T / (F_T + S_T)$		1.38	1.22
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T		3.94	5.16

ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.35	0.24

4.3 ผลการประเมินเอเมอร์จีของการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS®

จากผลการศึกษาทั้งสามกรณีศึกษาได้แก่ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดอุตสาหกรรม และกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำขนาดต้นแบบ ทำให้พบข้อเสียของแต่ละระบบ ยกตัวอย่างใน กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบ มีกำลังการผลิตต่ำ ผลผลิตที่ได้ต่อต้นทุนจึงค่อนข้างต่ำ รวมถึงปริมาณเมทานอลถูกใช้ไปและเหลือทิ้งปริมาณมาก ในระบบนี้จำเป็นต้องศึกษาการเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้ค่าทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำลง และเพิ่มส่วนการนำเมทานอลกลับมาใช้เพื่อลดปริมาณเมทานอลที่สูญเสียไปให้มากที่สุด ส่วนระบบขนาดอุตสาหกรรมที่ใหญ่ขึ้นมาจะมีปัญหาเกี่ยวกับความจำเป็นต้องใช้ไอน้ำในการควบคุมระบบปริมาณมาก จำเป็นต้องศึกษาแบบจำลองเพื่อดูว่าสามารถนำความร้อนส่วนใดในระบบกลับมาใช้ได้บ้าง การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเฉพาะระบบปาล์มน้ำมัน เนื่องจากสบู่ดำมีความยั่งยืนต่ำมาก จะต้องเพิ่มศักยภาพของระบบตั้งแต่ขั้นการปลูก เพื่อลดปริมาณแรงงานและค่าใช้จ่าย รวมถึงการปรับปรุงผลผลิตให้ได้สูงขึ้น

สมมุติฐานที่ใช้

1. องค์ประกอบน้ำมันปาล์มใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Che Man [37] โดยสมมุติฐานให้กรดโอเลอิกเป็นหมู่พื้นฐานที่ใช้ในการจำลอง และองค์ประกอบของทะลายปาล์มใช้ข้อมูลจากรายงานของ Somrat และ Krongkaew [38]
2. การจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีพื้นฐานมาจากงานวิจัยของ Zhang [39] รายงานของ NREL [40] และงานวิจัยของ Narvaez [41]
3. การจำลองกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ผ่านกระบวนการหมักมีพื้นฐานมาจากรายงานของ NREL [42]
4. การจำลองกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันมีพื้นฐานมาจากรายงานของ NREL [20]

5. ต้นทุนการสร้างโรงงานและค่าใช้จ่ายต่างๆในแบบจำลองทั้ง 3 คำนวณด้วยซอฟแวร์ Aspen Icarus Process Evaluator®

4.3.1 กรณีศึกษาที่ 4 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ในส่วนนี้จะศึกษาการจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบจริงและระบบจำลอง โดยตารางที่ 4.23 แสดงปริมาณเอเมอร์จีในส่วนของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล น้ำมันปาล์มจากขั้นการปลูกในตารางที่ 4.2 คิดเป็นร้อยละ 58 ของระบบ และในขั้นการผลิตไบโอดีเซลนี้จะมีกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกโดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นของแข็งของโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4)

จากภาพที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 4 เอเมอร์จีที่ถูกใช้ไปปริมาณสูงสุดของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลคือปริมาณสารเคมี คิดเป็นร้อยละ 30 ส่วนเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายคิดเป็น ร้อยละ 23 ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าทรานส์ฟอร์มิตี แบบที่รวมเอเมอร์จีของแรงงานและค่าใช้จ่ายและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีของ แรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับ 1.12 x 10^5 sej/j และ 8.66 x 10^4 sej/j ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เนื่องจากระบบนี้มีกำลังการผลิต 312 ตันต่อวัน ซึ่งสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 1 ถึงสิบเท่า และสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 2 อยู่ 12 ตันต่อวัน

ระบบนี้มีเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายต่ำกว่าสามกรณีแรก แต่ปริมาณการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนไม่ได้ยังสูง มีปริมาณ 1.03 x 10^{16} sej/ha/yr หรือคิดเป็นร้อยละ 80 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ โดยร้อยละ 49 คิดเป็นเอเมอร์จีจากทรัพยากรนำเข้ามาในระบบ ซึ่งส่วนใหญ่คือสารเคมีในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดัชนีความยั่งยืนของระบบนี้อยู่ที่ 0.35

หากลดปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลลงได้หรือสามารถสร้างขึ้นมาได้จากผลิตภัณฑ์เหลือใช้ในระบบ น่าจะสามารถลดสัดส่วนของทรัพยากรที่ไม่หมุนเวียนลงได้ ซึ่งสมมุติฐานนี้จะนำไปสู่กรณีศึกษาที่ 5 และ 6

ตารางที่ 4.23 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 4

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	น้ำมันปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	1.21E+11	J/ha/yr	6.52E+04	sej/J	7.92E+15	sej/ha/yr	61%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	สารเคมี:							
2	เมทานอล	366.34	kg/ha/yr	7.23E+09	sej/g	2.65E+15	sej/ha/yr	20%
3	ตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH)	151.30	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/g	9.65E+14	sej/ha/yr	7%
4	H_3PO_4	89.45	kg/ha/yr	2.65E+09	sej/g	2.37E+14	sej/ha/yr	2%
5	น้ำหล่อเย็น	120.34	kg/ha/yr	6.64E+05	sej/g	7.99E+10	sej/ha/yr	0%
6	ไฟฟ้า	3.57E+06	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	1.20E+12	sej/ha/yr	0%
7	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	125.56	kg/ha/yr	1.10E+05	sej/J	5.78E+14	sej/ha/yr	4%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
8	ค่าแรง	45.57	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.69E+14	sej/ha/yr	1%
9	ค่าจ้างอื่นๆ	91.86	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	3.40E+14	sej/ha/yr	3%
10	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	30.57	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.13E+14	sej/ha/yr	1%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					2.98E+15	sej/ha/yr	23%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)					1.30E+16	sej/ha/yr	77%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (รวม L&S)					1.00E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.24 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกรณีศึกษาที่ 4

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
ไบโอดีเซล	3030.88	kg/ha/yr	1.15E+11	J/ha/yr
กลีเซอรอล	321.37	kg/ha/yr	6.11E+09	J/ha/yr
รวม	3352.25	kg/ha/yr	1.21E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)			1.12E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			8.66E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (รวม L&S)			4.28E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			3.30E+12	sej/kg

ตารางที่ 4.25 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 4

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	**R[ก]**	**N[ก]**
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.90E+15		1.90E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A[ข]	2.36E+15	2.44E+14	2.11E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		2.57E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			5.36E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	7.92E+15		
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	4.43E+15		4.43E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	6.22E+14	6.42E+13	5.57E+14
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		6.42E+13	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			4.99E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	5.05E+15		

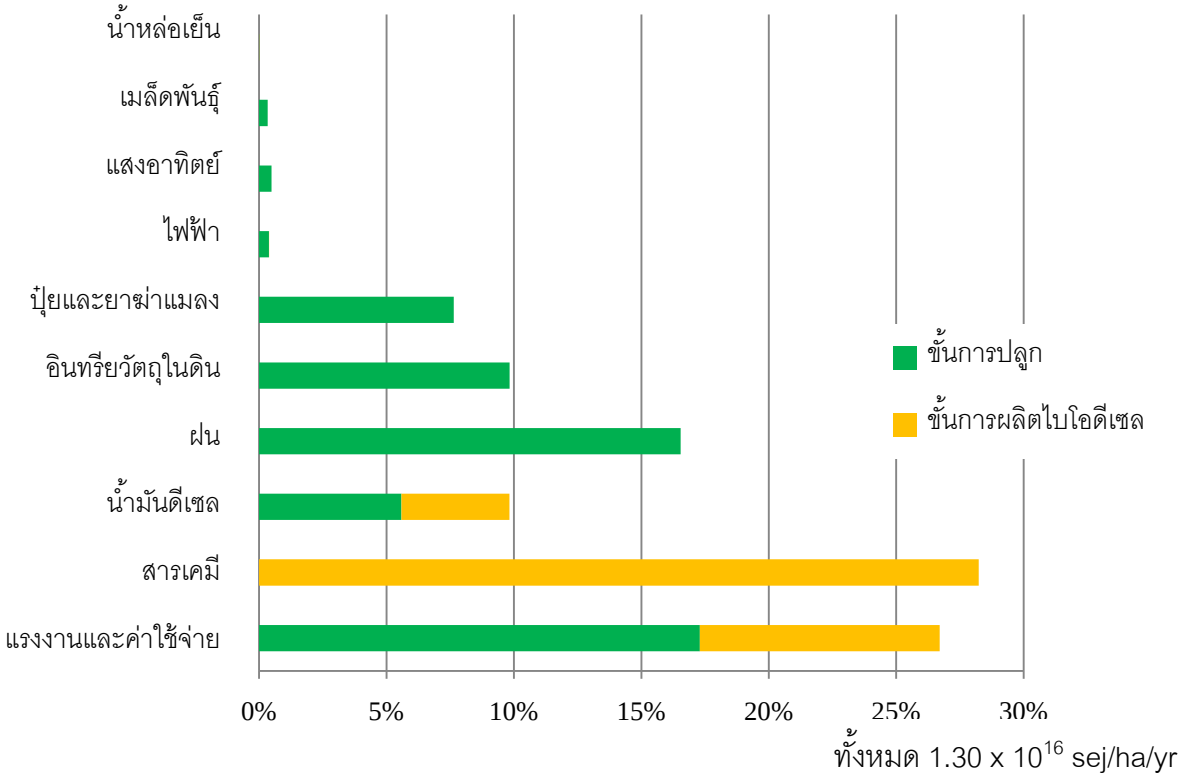
[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

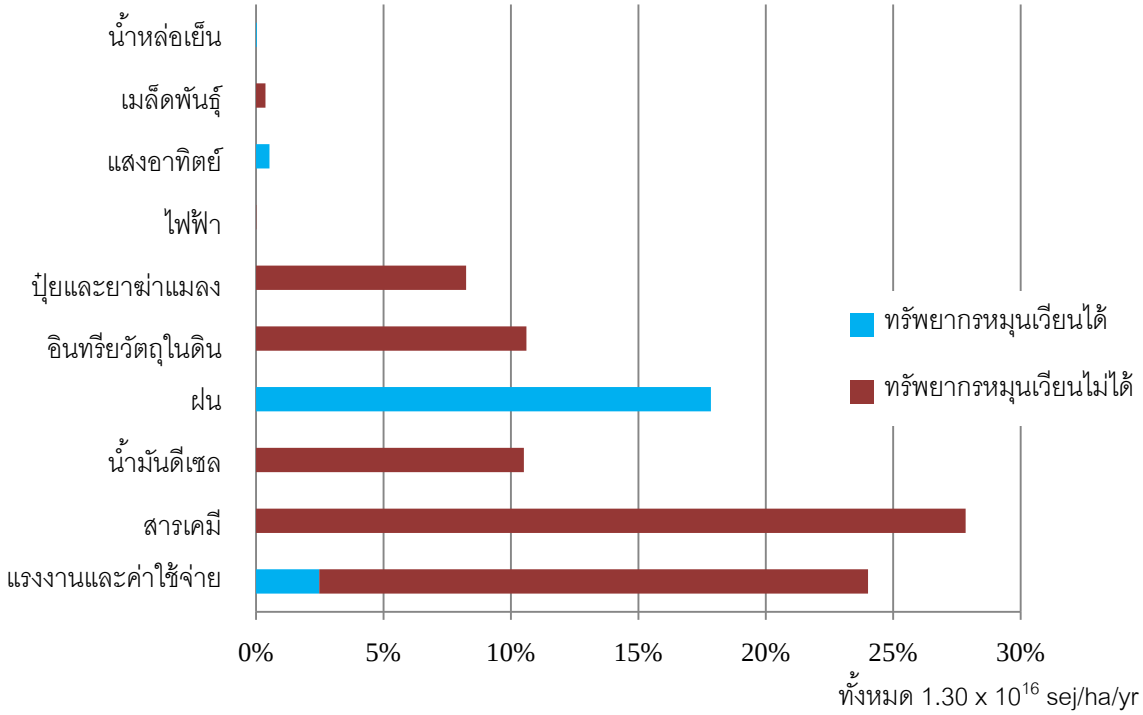
ตารางที่ 4.26 สรุปเอเมอร์จีของทั้งระบบกรณีศึกษาที่ 4

รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งระบบ
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	6.33E+15	49%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	2.98E+15	23%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	2.63E+15	20%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.03E+16	80%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.30E+16	

ภาพที่ 4.9 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในระบบกรณีศึกษาที่ 4



ภาพที่ 4.10 การกระจายตัวของทรัพยากรในระบบกรณีศึกษาที่ 4



ตารางที่ 4.27 ดัชนีความยั่งยืนของระบบกรณีศึกษาที่ 4

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)	3.67E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)	2.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	2.09	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.89	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	1.12E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	8.66E+04	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.39	
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	3.93	
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.35	

4.3.2 กรณีศึกษาที่ 5 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากแอลกอฮอล์แบบที่ 1

จากกรณีศึกษาที่ผ่านมามีการใช้เมทานอลในระบบปริมาณมาก ซึ่งหากเราสามารถผลิตเมทานอลขึ้นได้จากกากเหลือในระบบก็น่าจะเพิ่มสัดส่วนเอเมอร์จีจากทรัพยากรหมุนเวียนได้ขึ้นมา และลดปริมาณสารเคมีที่ต้องนำเข้ามาในระบบได้ ในกรณีศึกษาที่ 5 นี้จะมีการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตเอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอลผ่านกระบวนการหมักเพื่อนำมาใช้แทนเมทานอลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล นอกจากนี้เอทานอลที่เหลือจากผลิตไบโอดีเซลยังสามารถนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกอื่นได้ เช่น แก๊สโซฮอล์

ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์

ตารางที่ 4.28 แสดงปริมาณเอเมอร์จีในส่วนของกระบวนการผลิตไบโอเอทานอล จะพบว่าในกระบวนการนี้มีการใช้ไอน้ำปริมาณมาก เนื่องจากในระบบมีส่วนปรับสภาพ (Pre-treatment) ซึ่งใช้ย่อยชีวมวลให้เล็กลงก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก ในส่วนนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 190 องศาเซลเซียส และความดันสูงถึง 12.1 บาร์ จึงจำเป็นต้องใช้ไอน้ำนำไปอัดความดันสูงเพื่อปรับสายป้อนเข้าให้ได้ตรงตามภาวะ และยังต้องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิและความดันคงที่อยู่ตลอด เอทานอลที่ผลิตได้มีค่าทรานส์ฟอร์มิตีแบบที่รวมและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 8.56×10^5 sej/J และ 6.31×10^5 sej/J ตามลำดับ และมีดัชนีความยั่งยืนอยู่ที่ 0.28

แบบจำลองนี้มีกำลังการผลิตเอทานอลอยู่ที่ 23 ตันต่อวัน คิดเป็น 776 kg/ha/yr และจะถูกใช้ไปในการผลิตไบโอดีเซล 48 ตันต่อวันหรือ 465.5 kg/ha/yr ทำให้เหลือเอทานอลอยู่ 310.5 kg/ha/yr

ตารางที่ 4.28 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	กากปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	8.16E+03	kg/ha/yr	7.08E+11	sej/kg	5.77E+15	sej/ha/yr	46%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	สารเคมี:							
2	ตัวเร่งปฏิกิริยา (H_2SO_4)	100.41	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/g	6.41E+14	sej/ha/yr	5%
3	เอนไซม์ (เซลลูเลส)	136.54	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.05E+14	sej/ha/yr	4%
4	ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	0.42	kg/ha/yr	2.87E+09	sej/g	1.21E+12	sej/ha/yr	0%
5	ไอน้ำ	3090.93	kg/ha/yr	1.30E+09	sej/g	4.02E+15	sej/ha/yr	32%
6	น้ำหล่อเย็น	1392.84	kg/ha/yr	6.64E+05	sej/g	9.25E+11	sej/ha/yr	0%
7	ไฟฟ้า	1.93E+08	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	6.48E+13	sej/ha/yr	1%
8	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	2.99	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/J	1.12E+13	sej/ha/yr	0%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
9	ค่าแรง	119.33	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	4.42E+14	sej/ha/yr	3%
10	ค่าจ้างอื่นๆ	234.33	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	8.67E+14	sej/ha/yr	7%
11	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	79.10	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	2.93E+14	sej/ha/yr	2%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					3.32E+15	sej/ha/yr	26%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)					9.30E+15	sej/ha/yr	74%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตแอลกอฮอล์ (รวม L&S)					1.26E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.29 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
เอทานอล	776	kg/ha/yr	1.47E+10	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)			8.56E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)			6.31E+05	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)			1.63E+13	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)			1.20E+13	sej/kg

ตารางที่ 4.30 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	$R^{ก}$	$N^{ก}$
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	1.69E+15	1.69E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	9.78E+14		9.78E+14
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.39E+15		1.39E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A [ข]	1.72E+15	1.78E+14	1.54E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		1.87E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			3.91E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	5.78E+15		
ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	4.10E+15		4.10E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	1.60E+15	1.65E+14	1.44E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		1.65E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			5.53E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	5.70E+15		

[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

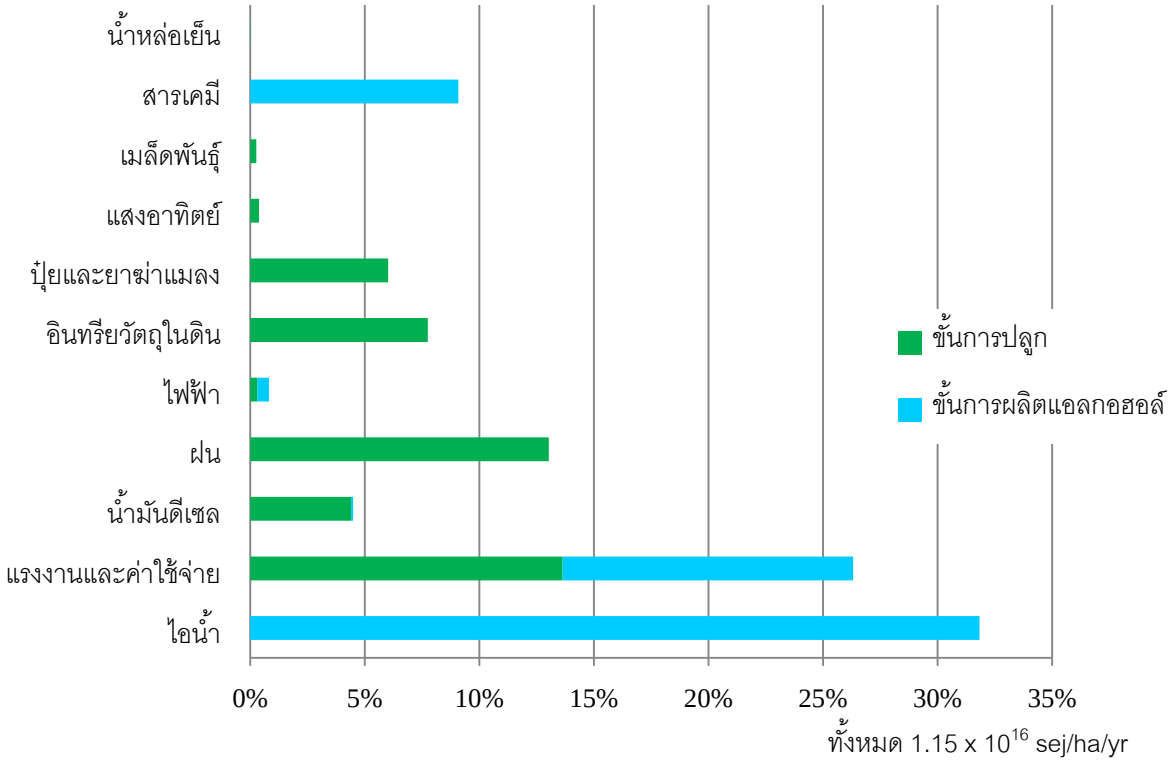
ตารางที่ 4.31 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5

รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วน
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	5.48E+15	48%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	3.32E+15	29%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	2.04E+15	18%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	9.44E+15	82%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.15E+16	

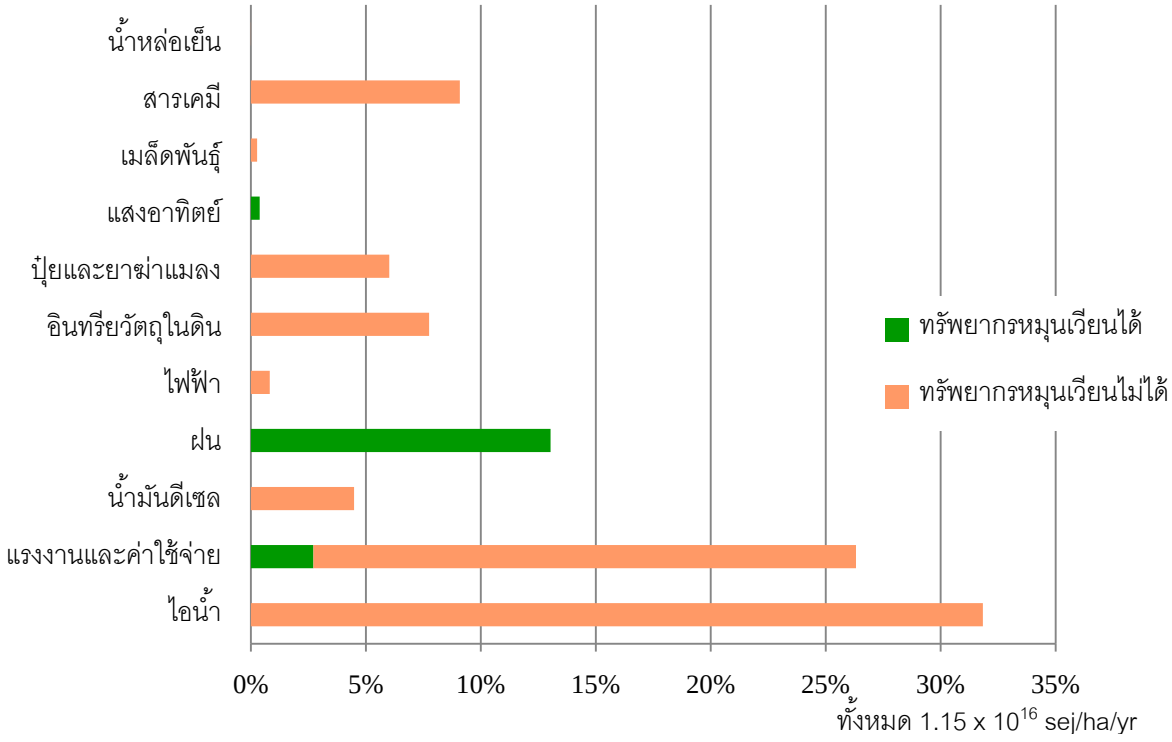
ตารางที่ 4.32 ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (รวม L&S)	3.67E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (ไม่รวม L&S)	2.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = $Y_A / (F_A + S_A)$	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	2.09	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.89	
ขั้นการผลิตไบโอแอลกอฮอล์		
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)	8.56E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)	6.31E+05	sej/J
EYR ของแอลกอฮอล์ = $Y_T / (F_T + S_T)$	1.30	
ELR ของแอลกอฮอล์ = N_T / R_T	4.63	
ESI ของแอลกอฮอล์ = EYR / ELR	0.28	

ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ กรณีศึกษาที่ 5



ภาพที่ 4.12 การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ กรณีศึกษาที่ 5



ขั้นการผลิตไบโอดีเซล

หลังจากได้เอทานอลจากกระบวนการหมัก จะเป็นขั้นการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในกรณีศึกษานี้ใช้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤต เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลผ่านกระบวนการทั่วไปจะได้ผลิตภัณฑ์ผสมระหว่างกลีเซอรอล ไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือ แอลกอฮอล์ และเอสเทอร์ ที่ไม่สามารถแยกให้บริสุทธิ์เพียงพอได้ โดยในระบบที่จำลองจะใช้ภาวะที่ 100 บาร์ 350 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.33 แสดงปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งรวมเอเมอร์จีในการผลิตไบโอเอทานอล จะพบว่าเอเมอร์จีที่ถูกใช้ปริมาณมากสุดคือแรงงานและค่าใช้จ่าย คิดเป็นร้อยละ 31 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ รองลงมาคือไอน้ำที่ใช้ควบคุมระบบไบโอเอทานอล คิดเป็นร้อยละ 26 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะปกติในกรณีศึกษาที่ 4 กับที่ภาวะเหนือวิกฤตจะพบว่ากรณีศึกษาที่ 4 มีการใช้สารเคมีมากกว่า เพราะนอกเหนือจากเมทานอลแล้วยังต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารวมถึงสารเคมีที่ใช้แยกตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในกรณีศึกษาที่ 5 นี้มีไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล แต่มีการใช้ไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความดันของระบบซึ่งสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 4 ถึง 25 เท่า

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในระบบนี้ได้แก่ เอทานอลและไบโอดีเซลซึ่งจำลองด้วยเอทิลโอลีเอต โดยมีทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซลแบบที่รวมและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 1.36×10^5 sej/J และ 9.34×10^4 sej/J ตามลำดับ ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงชีวภาพทั้งไบโอดีเซลและเอทานอลแบบที่รวมและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 1.29×10^5 sej/J และ 8.89×10^4 sej/J ตามลำดับ และมีดัชนีความยั่งยืนของทั้งระบบอยู่ที่ 0.34 ซึ่งทำให้สรุปสมมุติฐานการนำเอทานอลที่ผลิตได้มาใช้แทนเมทานอลได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถลดปริมาณสารเคมีที่นำเข้ามาในระบบได้ แต่ตัวแปรสำคัญที่เพิ่มเข้ามาคือปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอเอทานอล ซึ่งทำให้ดัชนีความยั่งยืนของระบบลดลง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสูงกว่าระบบเดิมซึ่งช่วยให้ทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าต่ำลง

ตารางที่ 4.33 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	น้ำมันปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	3.03E+03	kg/ha/yr	7.08E+11	sej/kg	2.14E+15	sej/ha/yr	14%
2	กากปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	8.16E+03	kg/ha/yr	7.08E+11	sej/kg	5.78E+15	sej/ha/yr	37%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
3	ตัวเร่งปฏิกิริยา (H_2SO_4)	100.41	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/g	6.41E+14	sej/ha/yr	4%
4	เอนไซม์ (เซลลูเลส)	136.54	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.05E+14	sej/ha/yr	3%
5	ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	0.42	kg/ha/yr	2.87E+09	sej/g	1.21E+12	sej/ha/yr	0%
6	ไอน้ำ	3090.93	kg/ha/yr	1.30E+09	sej/g	4.02E+15	sej/ha/yr	26%
7	น้ำหล่อเย็น	1944.51	kg/ha/yr	6.64E+05	sej/g	1.29E+12	sej/ha/yr	0%
8	ไฟฟ้า	2.74E+08	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	9.20E+13	sej/ha/yr	1%
9	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	121.82	kg/ha/yr	6.38E+09	sej/J	5.82E+14	sej/ha/yr	4%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
10	ค่าแรง	184.05	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	6.81E+14	sej/ha/yr	4%
11	ค่าจ้างอื่นๆ	367.76	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.36E+15	sej/ha/yr	9%
12	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	122.98	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	4.55E+14	sej/ha/yr	3%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					4.86E+15	sej/ha/yr	31%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)					1.08E+16	sej/ha/yr	69%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (รวม L&S)					1.56E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.34 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
ไบโอดีเซล	3026.31	kg/ha/yr	1.15E+11	J/ha/yr
แอลกอฮอล์ที่เหลือ:				
เมทานอล	310.5	kg/ha/yr	5.90E+09	J/ha/yr
รวม	3336.79	kg/ha/yr	1.21E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)			1.36E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			9.34E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (รวม L&S)			5.16E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			3.56E+12	sej/kg
ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงที่ได้ (รวม L&S)			1.29E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงที่ได้ (ไม่รวม L&S)			8.89E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของเชื้อเพลิงที่ได้ (รวม L&S)			4.68E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของเชื้อเพลิงที่ได้ (ไม่รวม L&S)			3.23E+12	sej/kg

ตารางที่ 4.35 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	R^n	N^n
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.90E+15		1.90E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A[ข]	2.36E+15	6.11E+14	1.75E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		2.93E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			4.99E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	7.92E+15		

ตารางที่ 4.35 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5 (ต่อ)

รายการ	ปริมาณ (sej/ha/yr) ทั้งหมด	$R^{ก}$	$N^{ก}$
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	5.20E+15		5.20E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	2.50E+15	2.58E+14	2.24E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		2.58E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			7.44E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	7.70E+15		

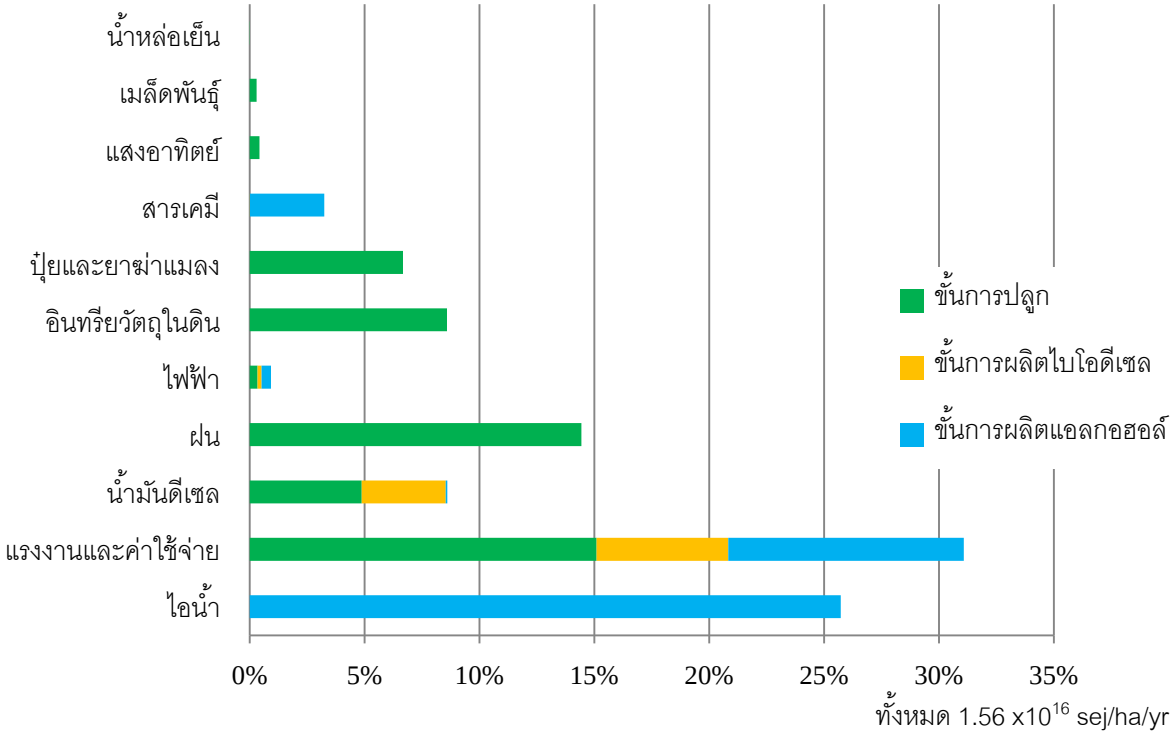
[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

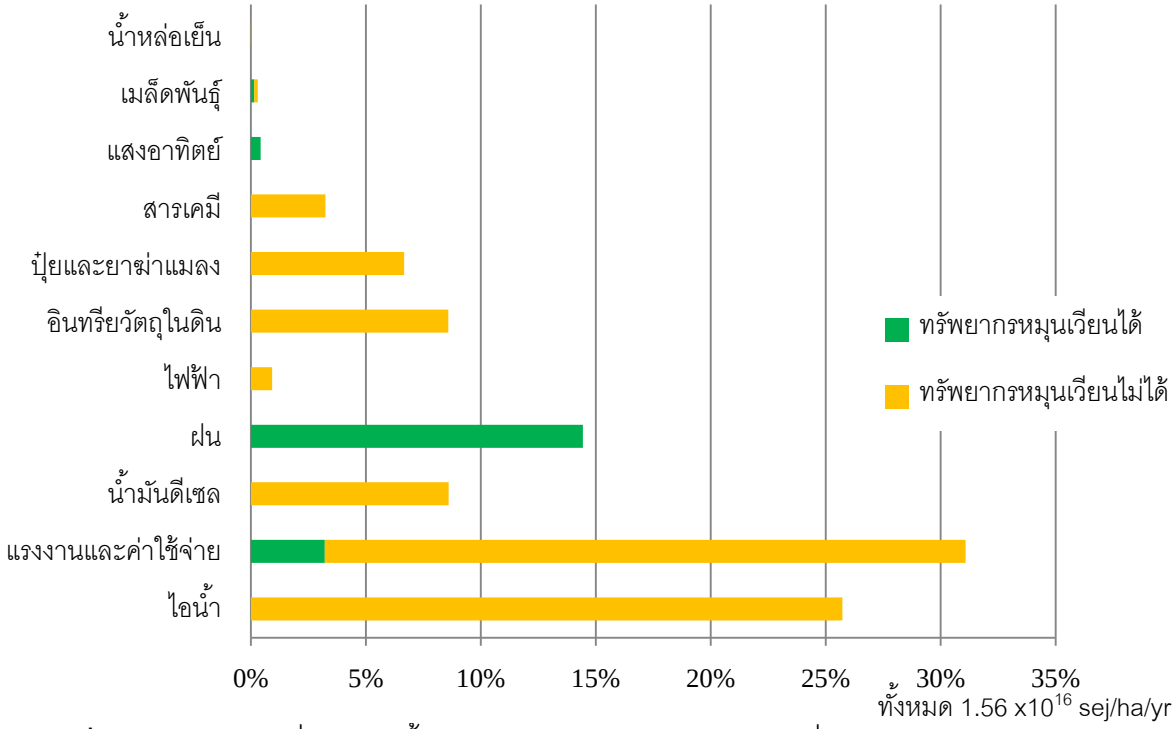
ตารางที่ 4.36 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5

รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งระบบ
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	7.10E+15	45%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	4.86E+15	31%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	3.19E+15	20%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.24E+16	80%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.56E+16	

ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในกรณีศึกษาที่ 5



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของทรัพยากรในกรณีศึกษาที่ 5



ตารางที่ 4.37 ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)	3.67E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)	2.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	1.70	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	1.09	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	1.29E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	8.89E+04	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.31	
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	3.90	

ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.34

4.3.3 กรณีศึกษาที่ 6 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยแอลกอฮอล์แบบที่ 2

กระบวนการผลิตแอลกอฮอล์จากชีวมวลที่นิยมในปัจจุบันมีสองวิธีดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ในกรณีศึกษาที่ 5 เป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอเอทานอลจากการหมักด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ส่วนในกรณีศึกษาที่ 6 นี้จะเป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันเพื่อให้ได้เมทานอล

ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์

สำหรับกระบวนการแกซิฟิเคชันจะเป็นระบบแก๊สเป็นส่วนใหญ่ การเพิ่มหรือลดความดันจะทำด้วยคอมเพรสเซอร์หรือเทอร์ไบน์ ซึ่งต้องใช้ไฟฟ้าในการควบคุม ทำให้ระบบนี้มีทั้งการใช้ไอน้ำและไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องปริมาณมาก จากตารางที่ 4.38 แสดงปริมาณเอเมอร์จีที่ใช้ในขั้นการผลิตเมทานอล จะพบว่ามีเอเมอร์จีจากไอน้ำถูกใช้ไปปริมาณสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 39 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นนี้ รองลงมาคือแรงงานและค่าใช้จ่าย คิดเป็นร้อยละ 19 และไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 11

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นนี้คือเมทานอลปริมาณ 107 ตันต่อวัน หรือ 3629.7 kg/ha/yr ซึ่งสูงกว่าเอทานอลที่ผลิตได้ในกรณีศึกษาที่ 5 และมีทรานส์ฟอร์มิตีแบบที่รวมและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีจาก

แรงงานและค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 1.87 x 10^5 sej/J และ 1.52 x 10^5 sej/J ตามลำดับ และมีดัชนีความยั่งยืนอยู่ที่ 0.22 ซึ่งต่ำกว่าเอทานอลในกรณีศึกษาที่ 5

เมทานอลจะถูกใช้ไปในขั้นการผลิตไบโอดีเซล 38 ตันต่อวัน ทำให้เหลือเป็นผลิตภัณฑ์อยู่ 3263.3 kg/ha/yr

ตารางที่ 4.38 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	กากปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	8.16E+03	kg/ha/yr	7.08E+11	sej/kg	5.77E+15	sej/ha/yr	45%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
	สารเคมี:							
2	ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเคมีอื่นๆ	6.08	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	2.25E+13	sej/ha/yr	0%
3	ไอน้ำ	3830.99	kg/ha/yr	1.30E+09	sej/g	4.98E+15	sej/ha/yr	39%
4	น้ำหล่อเย็น	199.79	kg/ha/yr	6.64E+05	sej/g	1.33E+11	sej/ha/yr	0%
5	ไฟฟ้า	4.14E+09	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	1.39E+15	sej/ha/yr	11%
6	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	1.63E+08	J/ha/yr	1.10E+05	sej/J	1.80E+13	sej/ha/yr	0%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
7	ค่าแรง	51.26	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.90E+14	sej/ha/yr	1%
8	ค่าจ้างอื่นๆ	104.79	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	3.88E+14	sej/ha/yr	3%
9	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	34.62	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.28E+14	sej/ha/yr	1%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					2.43E+15	sej/ha/yr	19%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)					1.05E+16	sej/ha/yr	81%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตแอลกอฮอล์ (รวม L&S)					1.29E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.39 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
เมทานอล	3629.7	kg/ha/yr	6.9E+10	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)			1.87E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)			1.52E+05	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)			3.55E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)			2.88E+12	sej/kg

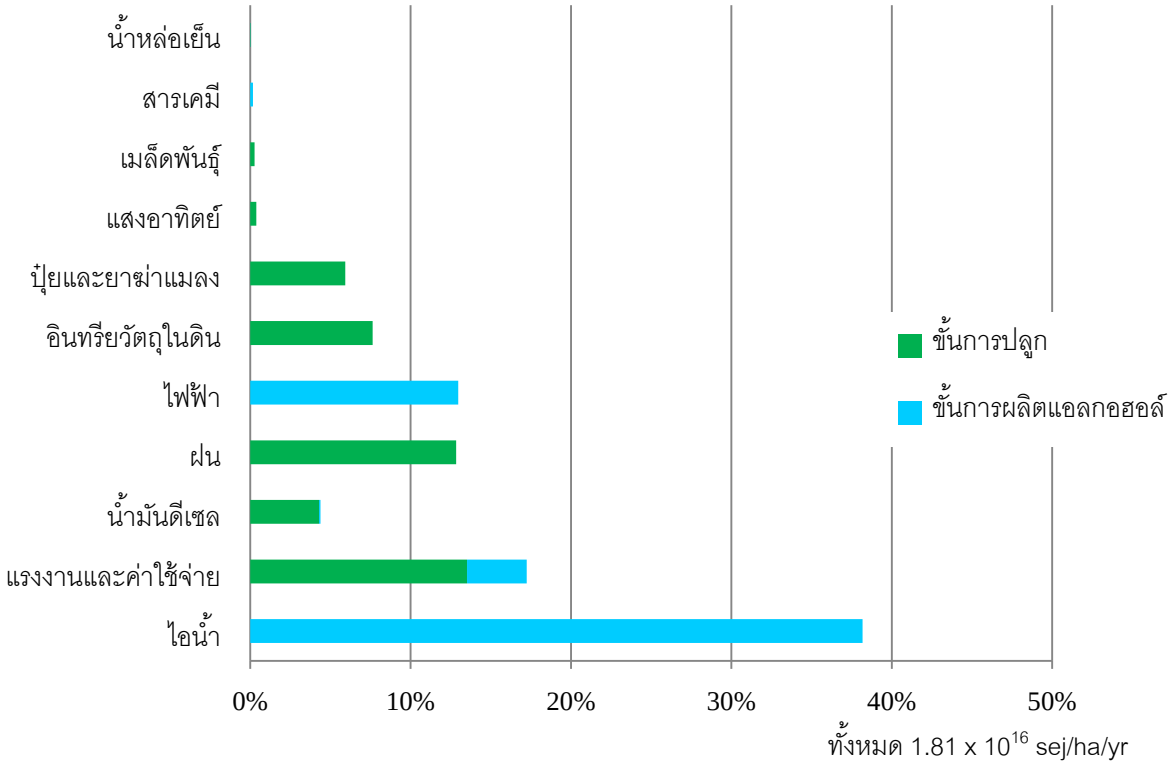
ตารางที่ 4.40 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	$R^{ก}$	$N^{ก}$
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.90E+15		1.90E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A[ข]	2.36E+15	6.11E+14	1.75E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		2.93E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			4.99E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	7.92E+15		
ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	8.17E+15		8.17E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	1.99E+15	2.06E+14	1.78E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		2.06E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			9.96E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	1.02E+16		

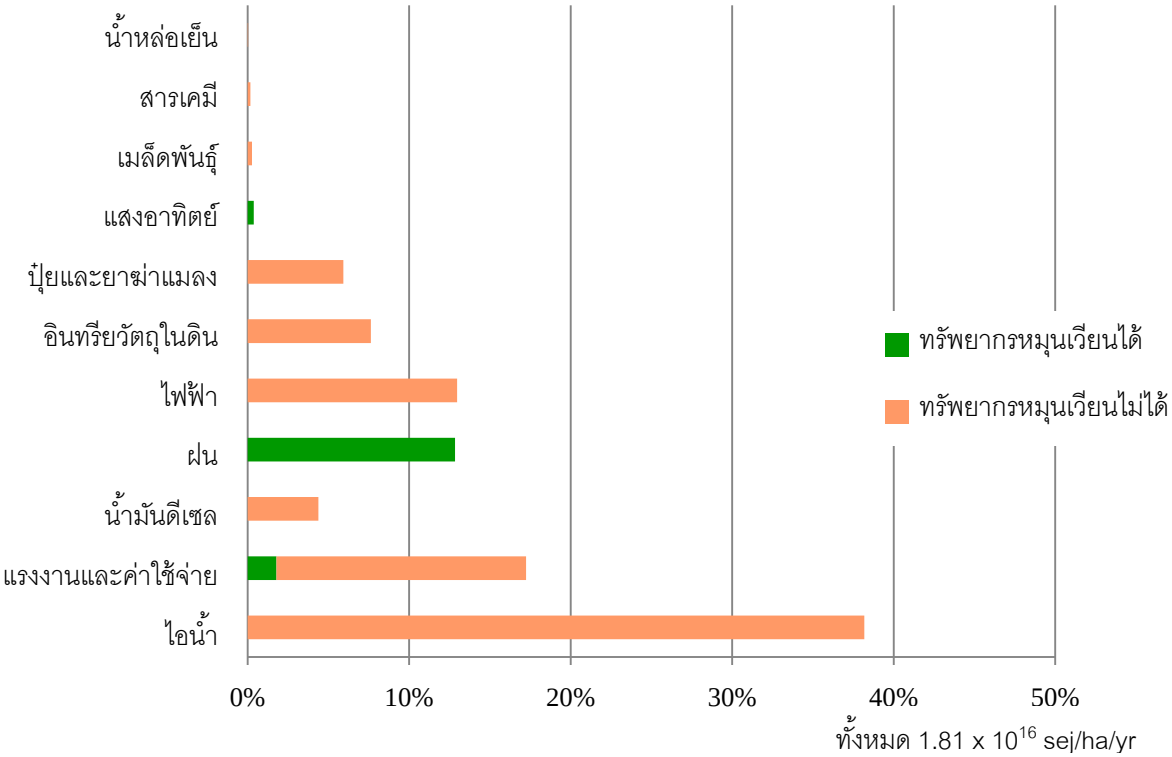
[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ กรณีศึกษาที่ 6



ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ กรณีศึกษาที่ 6



ตารางที่ 4.41 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6

รายการ	ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)	สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งระบบ
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	1.01E+16	56%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	4.35E+15	24%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	3.14E+15	17%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.49E+16	83%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.81E+16	

ตารางที่ 4.42 ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 6

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (รวม L&S)	3.69E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (ไม่รวม L&S)	2.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = $Y_A / (F_A + S_A)$	1.87	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	2.07	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.90	
ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์		
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)	3.92E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)	3.77E+05	sej/J
EYR ของแอลกอฮอล์ = $Y_T / (F_T + S_T)$	1.26	
ELR ของแอลกอฮอล์ = N_T / R_T	5.67	
ESI ของแอลกอฮอล์ = EYR / ELR	0.22	

ขั้นการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระบบนี้เป็นแบบทั่วไปเหมือนกรณีศึกษาที่ 4 เพียงแต่เปลี่ยนเมทานอลที่นำเข้ามาในระบบเป็นเพิ่มกระบวนการผลิตเมทานอลขึ้น ดังนั้นส่วนที่ต่างระหว่างกรณีศึกษาที่ 4 และ 6 คือปริมาณเอเมอร์จีในการผลิตแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้นมา เมื่อพิจารณาทั้งระบบดังในตารางที่ 4.43 และภาพที่ 4.17 จะพบว่าระบบมีการใช้เอเมอร์จีจากไอน้ำสูงที่สุด คิดเป็น ร้อยละ 28 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ โดยจะใช้ไปในการอัดเพิ่มความดันแก๊สภายในระบบ โดยเฉพาะในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ ซึ่งต้องอัดแก๊สสังเคราะห์ (Syn gas) ให้กลายเป็นเมทานอล ส่วนนี้ใช้ความดันสูงถึง 52 บาร์ เอเมอร์จีที่มีการใช้สูงรองลงมาคือเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่าย คิดเป็นร้อยละ 24 โดยที่ร้อยละ 11 เป็นเอเมอร์จีจากขั้นการผลิตไบโอดีเซลและเมทานอล

ระบบนี้มีการใช้เอเมอร์จีจากทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้คิดเป็น ร้อยละ 83 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบ และมีดัชนีความยั่งยืนอยู่ที่ 0.26 ซึ่งต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 5 แต่มีค่าทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงที่ได้ต่ำกว่า เนื่องจากระบบผลิตเมทานอลได้ปริมาณมากกว่า ทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์ที่ได้แบบที่รวมและแบบที่ไม่รวมเอเมอร์จีจากแรงงานและค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 1.02×10^{5} sej/J และ 7.75×10^{4} sej/J ตามลำดับ

สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากแอลกอฮอล์ที่ได้ในระบบอย่างกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 นี้สามารถลดเอเมอร์จีจากการนำเข้าแอลกอฮอล์ได้ถึง 2.65×10^{15} sej/ha/yr คิดเป็นร้อยละ 17 และ 15 ของเอเมอร์จีทั้งหมดในระบบกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีแอลกอฮอล์ที่เหลือจากระบบเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกอื่น ๆ ได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.43 ปริมาณเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ทรานส์ฟอร์มิตี	หน่วย	เอเมอร์จี	หน่วย	สัดส่วน
1	น้ำมันปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	3.03E+03	kg/ha/yr	7.08E+11	sej/kg	2.14E+15	sej/ha/yr	12%
2	กากปาล์มจากขั้นการปลูก (รวม L&S)	8.16E+03	kg/ha/yr	7.08E+11	sej/kg	5.78E+15	sej/ha/yr	32%
	ทรัพยากรจากภายนอกระบบ (Import)							
3	สารเคมีในการผลิตแอลกอฮอล์	6.08	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	8.67E+14	sej/ha/yr	5%
4	ตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH)	151.30	kg/ha/yr	3.68E+09	sej/g	9.65E+14	SeJ/ha/yr	5%
5	H_3PO_4	89.45	kg/ha/yr	2.65E+09	sej/g	2.37E+14	SeJ/ha/yr	1%
6	ไอน้ำ	3830.99	kg/ha/yr	1.30E+09	sej/g	4.98E+15	SeJ/ha/yr	28%
7	น้ำหล่อเย็น	320.14	kg/ha/yr	6.64E+05	sej/g	2.13E+11	SeJ/ha/yr	0%
8	ไฟฟ้า	4.14E+09	J/ha/yr	3.36E+05	sej/J	1.39E+15	SeJ/ha/yr	8%
9	น้ำมันดีเซล(สำหรับการขนส่ง)	5.25E+09	J/ha/yr	1.10E+05	sej/J	5.77E+14	sej/ha/yr	3%
	แรงงานและค่าใช้จ่าย:							
10	ค่าแรง	143.10	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	5.29E+14	SeJ/ha/yr	3%
11	ค่าจ้างอื่นๆ	297.09	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	1.10E+15	SeJ/ha/yr	6%
12	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	97.36	$/ha/yr	3.70E+12	sej/$	3.60E+14	SeJ/ha/yr	2%
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย (L&S)					4.35E+15	sej/ha/yr	24%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)					1.37E+16	sej/ha/yr	76%
	รวมเอเมอร์จีของขั้นผลิตไบโอดีเซล (รวม L&S)					1.81E+16	sej/ha/yr	100%

ตารางที่ 4.44 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**พลังงาน**	**หน่วย**
ไบโอดีเซล	3030.88	kg/ha/yr	1.15E+11	J/ha/yr
แอลกอฮอล์ที่เหลือ:				
เมทานอล	3263.3	kg/ha/yr	6.20E+10	J/ha/yr
รวม	6294.22	kg/ha/yr	1.77E+11	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)			1.57E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			1.19E+05	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (รวม L&S)			5.97E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)			4.53E+12	sej/kg
ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงที่ได้ (รวม L&S)			1.02E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงที่ได้ (ไม่รวม L&S)			7.75E+04	sej/J
เอเมอร์จีจำเพาะของเชื้อเพลิงที่ได้ (รวม L&S)			2.78E+12	sej/kg
เอเมอร์จีจำเพาะของเชื้อเพลิงที่ได้ (ไม่รวม L&S)			2.18E+12	sej/kg

ตารางที่ 4.45 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	R^n	N^n
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	2.32E+15	2.32E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	1.34E+15		1.34E+15
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.90E+15		1.90E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A[ข]	2.36E+15	6.11E+14	1.75E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A		2.93E+15	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A			4.99E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A	7.92E+15		

ตารางที่ 4.45 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6 (ต่อ)

	ปริมาณ (sej/ha/yr)		
รายการ	**ทั้งหมด**	**R[ก]**	**N[ก]**
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	8.17E+15		8.17E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	1.99E+15	2.06E+14	1.78E+15
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		2.06E+14	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			9.96E+15
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	1.02E+16		

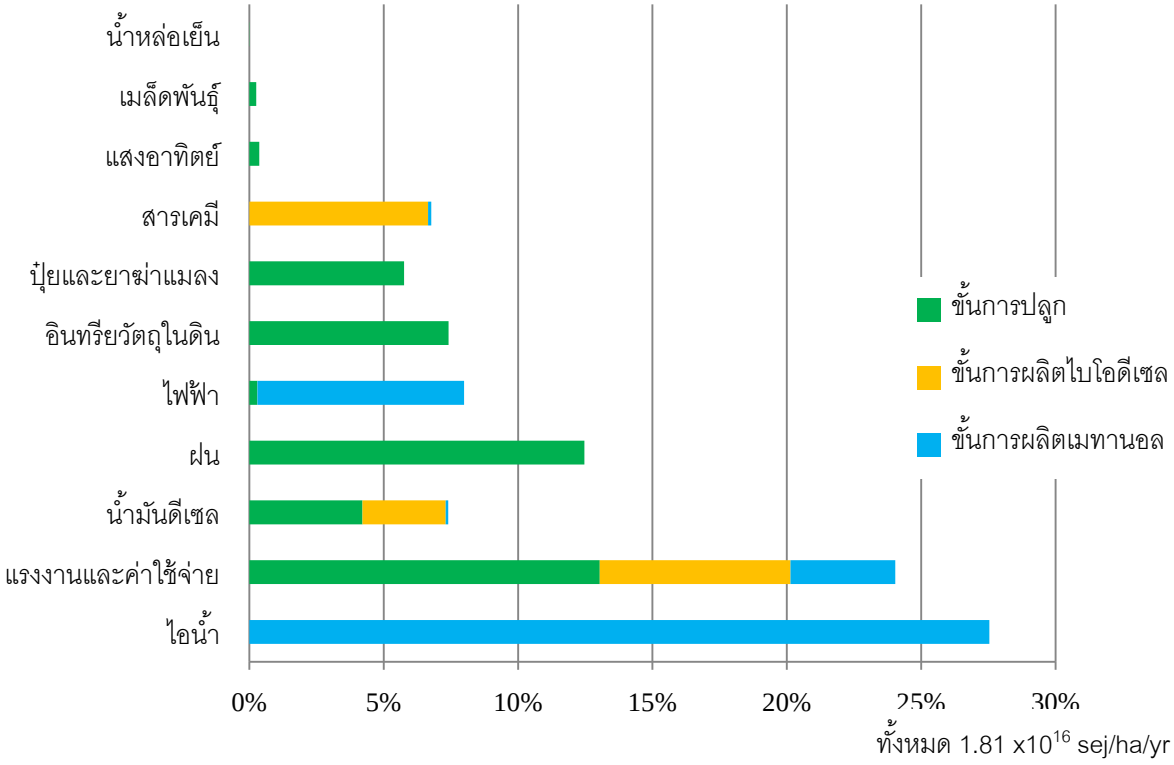
[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

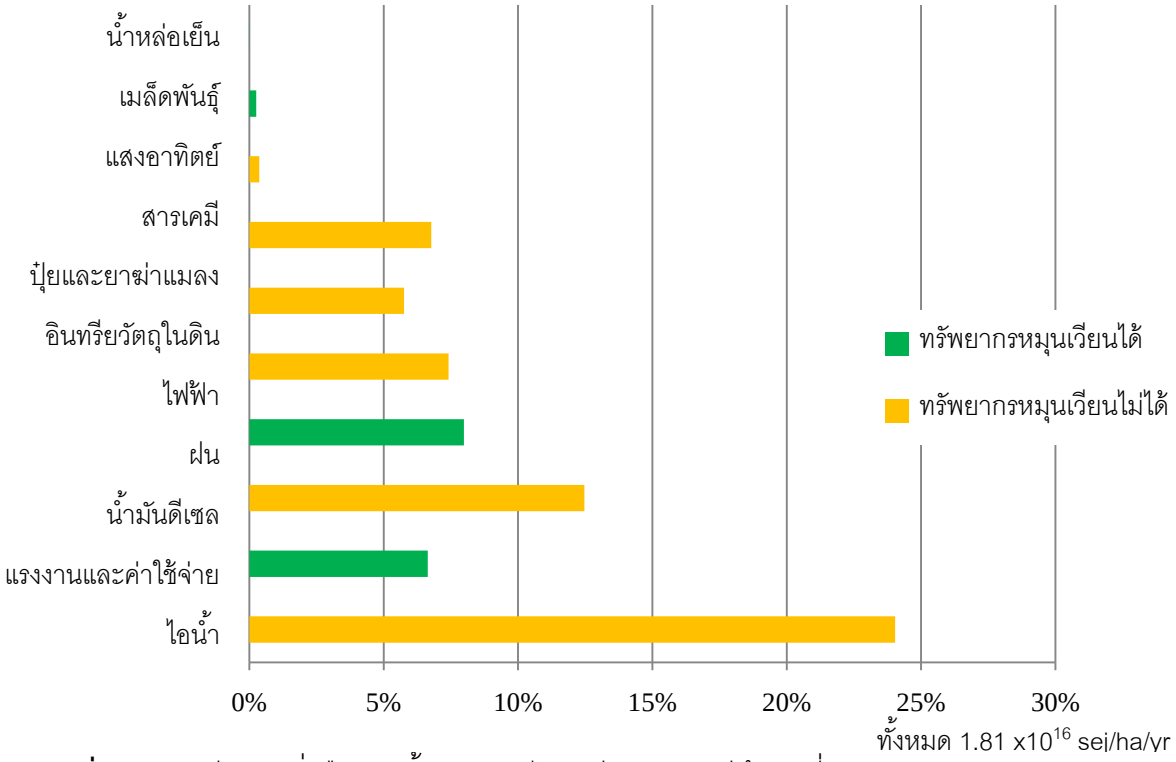
ตารางที่ 4.46 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6

รายการ	**ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)**	**สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งระบบ**
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	1.01E+16	56%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	4.35E+15	24%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	3.14E+15	17%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	1.49E+16	83%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	1.81E+16	

ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในกรณีศึกษาที่ 6



ภาพที่ 4.18 การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตไบโอดีเซล กรณีศึกษาที่ 6



ตารางที่ 4.47 ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 6

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (รวม L&S)	3.67E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม (ไม่รวม L&S)	2.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	1.70	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	1.09	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	1.02E+05	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	7.75E+04	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.25	

ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	4.76
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.26

4.3.4 กรณีศึกษาที่ 7 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยแอลกอฮอล์แบบที่ 2 ปรับปรุง

ในกรณีศึกษาที่ 6 ที่ได้กล่าวไปแล้วเป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันเพื่อให้ได้เมทานอล ซึ่งมีการใช้ไอน้ำและไฟฟ้าค่อนข้างสูง กรณีศึกษาที่ 7 นี้จะทำการปรับปรุงกรณีศึกษาที่ 6 โดยเพิ่มส่วนผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในระบบจากการนำแก๊สผลิตภัณฑ์เหลือใช้จากส่วนก่อนหน้ามาเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนมาแลกเปลี่ยนกับน้ำหล่อเย็นเพื่อผลิตเป็นไอน้ำ และนำไอน้ำความดันสูงที่ได้ไปใช้ปั่นเทอร์ไบน์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แผนผังกระบวนการแสดงในภาคผนวก ข

ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์

ดังที่กล่าวไปแล้วว่ากระบวนการแกซิฟิเคชันจะเป็นระบบแก๊สเป็นส่วนใหญ่ การเพิ่มหรือลดความดันจะทำด้วยคอมเพรสเซอร์หรือเทอร์ไบน์ ซึ่งต้องใช้ไฟฟ้าในการควบคุม ปริมาณไอน้ำและไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องในระบบมีความจำเป็นอย่างมาก ตารางที่ 4.48 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนผลิตไฟฟ้าและไอน้ำที่เพิ่มขึ้นมาในระบบ และในคอลัมน์สุดท้ายคือ ร้อยละที่เปลี่ยนแปลงจากผลในกรณีศึกษาที่ 6 โดยที่เครื่องหมายบวกแสดงปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสายนั้น ซึ่งจะพบว่าการเพิ่มส่วนผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเข้ามา จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณน้ำหล่อเย็นเข้ามาในระบบถึง 22 เท่าเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กลายเป็นไอน้ำ และมีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มขึ้นมา ร้อยละ 33 แต่สามารถผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าไว้ใช้ในระบบได้ทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีไฟฟ้าเหลือจากที่ผลิตได้เพื่อใช้สำหรับส่งออกนอกระบบสูงถึง 16.1 เมกะวัตต์ หรือคิดเป็น 1.75×10^{15} sej/ha/yr

ตารางที่ 4.51 แสดงดัชนีความยั่งยืนของการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 7 ซึ่งจะพบว่าเมื่อปรับปรุงกระบวนการจะช่วยเพิ่มดัชนีความยั่งยืนของการผลิตแอลกอฮอล์จากเดิมที่มีค่าเท่ากับ 0.22 สูงขึ้นเป็น 0.68 คิดเป็น 2 เท่าของค่าเดิม ซึ่งส่งผลให้ดัชนีความยั่งยืนของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

สูงขึ้นเป็น 0.52 จากเดิม 0.26 จะพบว่าการปรับปรุงกระบวนการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนให้แก่ระบบได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.48 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนที่ 5 ของกรณีศึกษาที่ 7

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	สัดส่วนที่เปลี่ยนแปลง
	<u>สายป้อนเข้า</u>			
1	น้ำหล่อเย็น	4.56E+03	kg/ha/yr	+2184%
2	ค่าแรง	67.84	$/ha/yr	
3	ค่าจ้างอื่นๆ	140.54	$/ha/yr	
4	ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์	46.22	$/ha/yr	
	รวมแรงงานและค่าใช้จ่าย	*254.59*	*$/ha/yr*	*+33%*
	<u>ผลิตภัณฑ์</u>			
1	ไฟฟ้า	5.21E+09	J/ha/yr	

ตารางที่ 4.49 สรุปปริมาณเอเมอร์จีในแต่ละส่วนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 7

รายการ	ปริมาณ (sej/ha/yr) ทั้งหมด	R^n	N^n
ขั้นการปลูก			
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้, R_L	1.69E+15	1.69E+15	
ทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนไม่ได้, N_L	9.78E+14		9.78E+14
ทรัพยากรนำเข้า, F_A	1.39E+15		1.39E+15
แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_A	1.72E+15	1.78E+14	1.54E+15
<u>รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_A</u>		1.87E+15	
<u>รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_A</u>			3.91E+15
<u>รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_A</u>	5.78E+15		
ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์			
ทรัพยากรนำเข้า, F_B	4.35E+13		4.35E+13

แรงงานและค่าใช้จ่าย, S_B	9.42E+14	9.73E+13	8.44E+14
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้, R_B		9.73E+13	
รวมเอเมอร์จีที่หมุนเวียนไม่ได้, N_B			8.88E+14
รวมเอเมอร์จีที่ป้อนให้ระบบ, Y_B	9.85E+14		

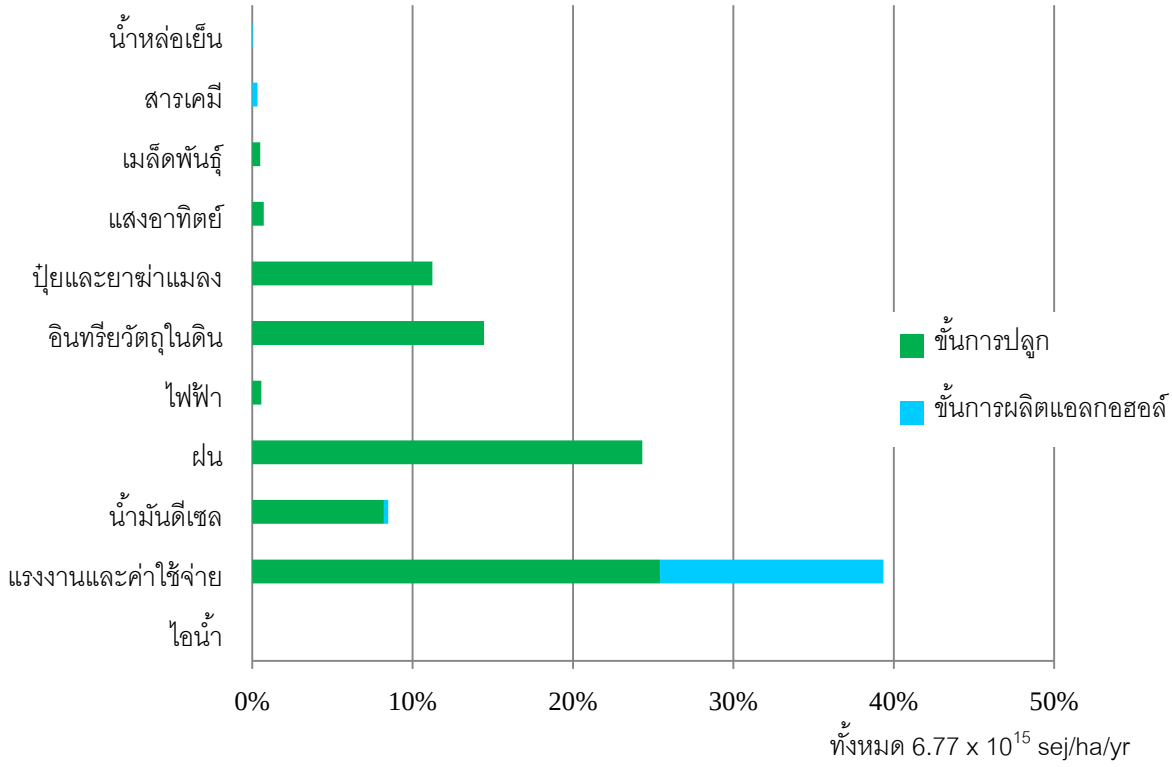
[ก] R คือส่วนที่หมุนเวียนได้, N คือส่วนที่หมุนเวียนไม่ได้

[ข] สัดส่วน R ในแรงงานและค่าใช้จ่ายเท่ากับร้อยละ 10

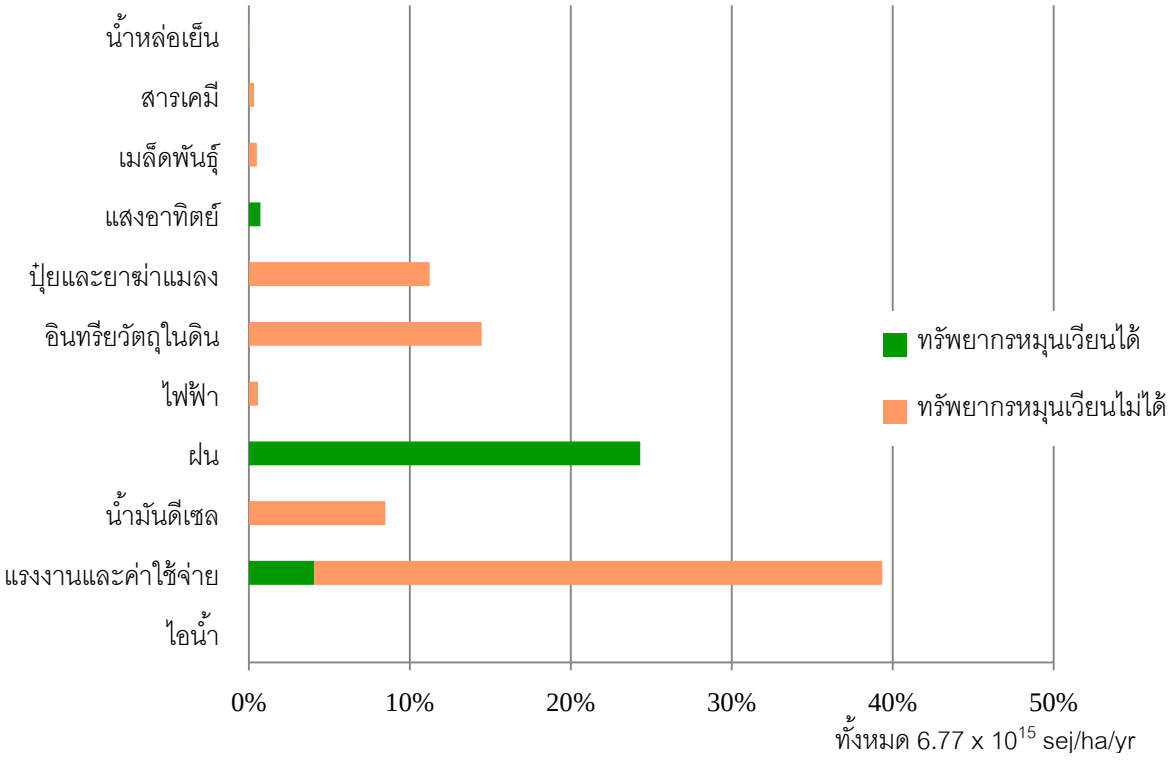
ตารางที่ 4.50 สรุปเอเมอร์จีของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 7

รายการ	**ปริมาณเอเมอร์จี (sej/ha/yr)**	**สัดส่วนเทียบกับเอเมอร์จีทั้งระบบ**
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	1.43E+15	21%
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	2.66E+15	39%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	1.97E+15	29%
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	4.80E+15	71%
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	6.77E+15	

ภาพที่ 4.19 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ กรณีศึกษาที่ 7



ภาพที่ 4.20 การกระจายตัวของทรัพยากรในขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ กรณีศึกษาที่ 6



ตารางที่ 4.51 ดัชนีความยั่งยืนของขั้นการผลิตแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 7

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นการปลูก		
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (รวม L&S)	3.67E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม (ไม่รวม L&S)	2.58E+04	sej/J
EYR ของชีวมวล = Y_A / (F_A + S_A)	1.86	
ELR ของชีวมวล = N_A / R_A	2.09	
ESI ของชีวมวล = EYR / ELR	0.89	
ขั้นการผลิตแอลกอฮอล์		
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (รวม L&S)	9.81E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของแอลกอฮอล์ (ไม่รวม L&S)	5.95E+04	sej/J
EYR ของแอลกอฮอล์ = Y_T / (F_T + S_T)	1.65	
ELR ของแอลกอฮอล์ = N_T / R_T	2.44	
ESI ของแอลกอฮอล์ = EYR / ELR	0.68	
ขั้นการผลิตไบโอดีเซล		
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	6.74E+04	sej/J
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	4.16E+04	sej/J
EYR ของไบโอดีเซล = Y_T / (F_T + S_T)	1.44	
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T	2.78	
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR	0.52	

4.4 เปรียบเทียบผลการประเมินเอเมอร์จีของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประเมินเอเมอร์จีของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั้ง 3 กรณีศึกษา ซึ่งได้แก่

กรณีศึกษาที่ 4 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

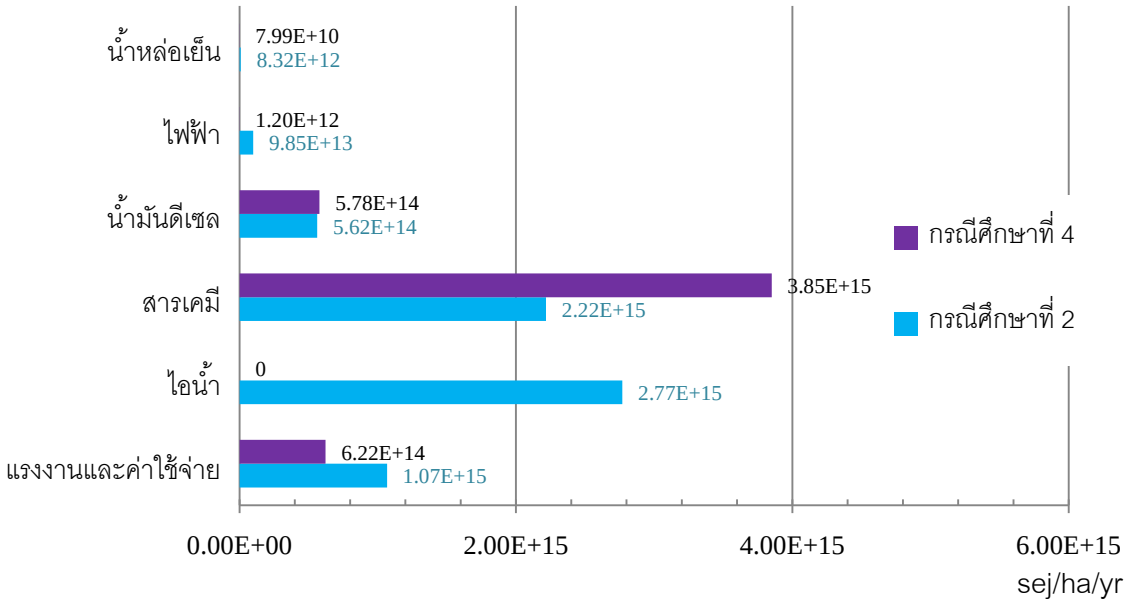
กรณีศึกษาที่ 5 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 1

กรณีศึกษาที่ 6 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 2

4.4.1 เปรียบเทียบผลของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยและแบบจำลองกระบวนการ

ภาพที่ 4.19 แสดงผลเปรียบเทียบเอเมอร์จีในระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดอุตสาหกรรมหรือกรณีศึกษาที่ 2 (สีฟ้า) และแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลหรือกรณีศึกษาที่ 4 (สีม่วง) เอเมอร์จีแต่ละส่วนแสดงในหน่วย sej/ha/yr หรือโซลาร์เอ็มจูลต่อเฮคแทร์ต่อปี ผลการเปรียบเทียบพบว่าในกรณีศึกษาที่ 2 มีการใช้เอเมอร์จีจากไอน้ำปริมาณมากเนื่องจากระบบขนาดอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้ไอน้ำและน้ำหล่อเย็นในการควบคุมอุณหภูมิ เมื่อเทียบกับแบบจำลองในกรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นการจำลองด้วยโปรแกรม มีการใช้น้ำหล่อเย็นในการควบคุมระบบแต่ใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่ระบบ และเนื่องจากแบบจำลองมีการควบคุมระบบค่อนข้างอุดมคติสามารถดึงความร้อนจากทุกๆส่วนมาใช้ได้ ทำให้มีการใช้ปริมาณไฟฟ้าค่อนข้างน้อย ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นอาจเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ในแบบจำลองยังมีการใช้กรดฟอสฟอริกในการกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือมากับผลิตภัณฑ์เพื่อเปลี่ยนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นของแข็งของโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ทำให้ง่ายต่อการแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้ ทำให้มีการใช้สารเคมีสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 2

ภาพที่ 4.21 การกระจายตัวของเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขนาดอุตสาหกรรมและแบบจำลองกระบวนการ



ตารางที่ 4.52 ผลของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขนาดอุตสาหกรรมและแบบจำลองกระบวนการต่อดัชนีความยั่งยืนของระบบ

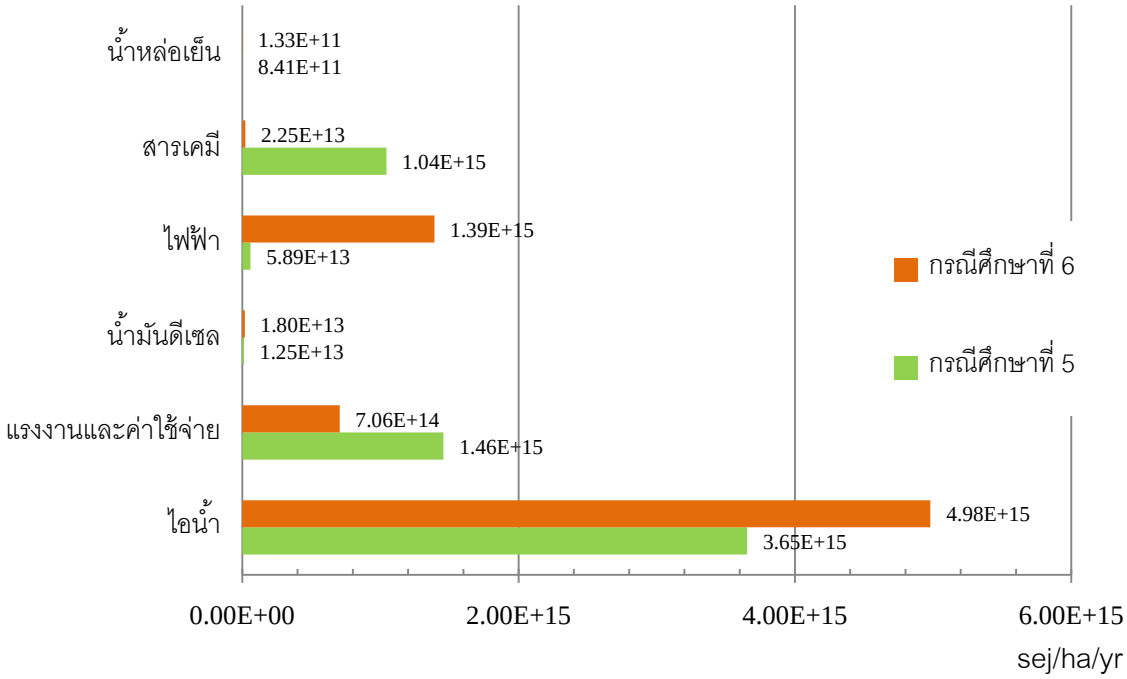
รายการ	**หน่วย**	**กรณีศึกษาที่ 2**	**กรณีศึกษาที่ 4**
รวมทั้งระบบ			
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	sej/ha/yr	7.49E+15	6.33E+15
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	sej/ha/yr	3.43E+15	2.98E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	sej/ha/yr	2.68E+15	2.63E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	sej/ha/yr	1.19E+16	1.03E+16
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	sej/ha/yr	1.46E+16	1.30E+16
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	sej/J	1.36E+05	1.12E+05
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	sej/J	1.04E+05	8.66E+04
EYR ของไบโอดีเซล = $Y_T / (F_T + S_T)$		1.34	1.39
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T		4.43	3.93
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR		0.30	0.35

4.4.2 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยแอลกอฮอล์ในระบบแบบที่ 1 และแบบที่ 2

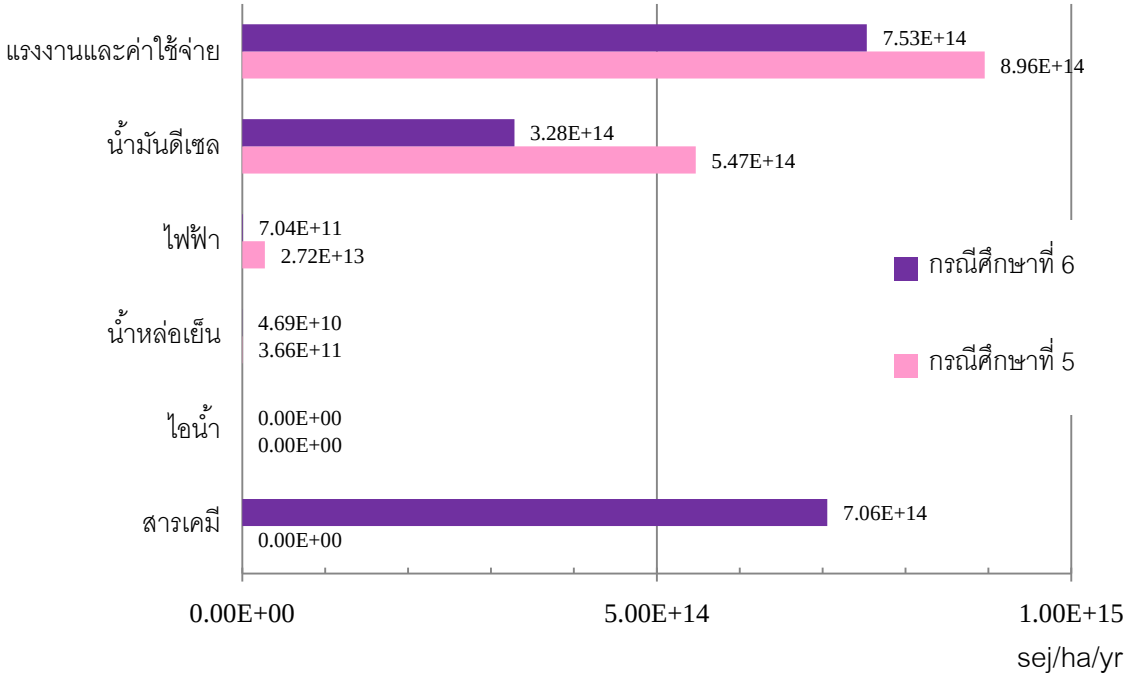
ภาพที่ 20 และภาพที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีแอลกอฮอล์และไบโอดีเซลระหว่างกรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งเป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลที่ผลิตจากกากปาล์มผ่านกระบวนการหมัก และกรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งเป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเมทานอลที่ผลิตจากกากปาล์มผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันและฟิชเชอร์ทรอปช์ จากภาพที่ 20 (สีเขียว) การผลิตไบโอเอทานอลผ่านกระบวนการหมักในกรณีศึกษาที่ 5 จำเป็นต้องใช้สารเคมีปริมาณมาก ได้แก่ กรดที่ใช้ในการปรับสภาพก่อนเข้าสู่การหมัก เอนไซม์ที่ใช้ย่อย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แยกเอทานอลให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ในขณะที่การผลิตเมทานอลผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน (สีส้ม) จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย แต่กระบวนการผลิตเมทานอลนี้จำเป็นต้องควบคุมระบบให้เป็นแก๊สซึ่งต้องใช้ความร้อนจากไอน้ำปริมาณมาก และใช้ไฟฟ้าในการอัดแก๊สให้มีความดันสูงโดยเฉพาะในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปช์ ซึ่งต้องทำให้ความดันของแก๊สสูงถึง 65 บาร์ ในกรณีศึกษาที่ 6 นี้จึงมีการใช้ทั้งไอน้ำและไฟฟ้าปริมาณมากกว่ากรณีศึกษาที่ 5 ควรมีการปรับปรุงระบบด้วยการเพิ่มส่วนผลิตไฟฟ้าจากการนำแก๊สสังเคราะห์ที่เหลือจากการผลิตเมทานอลมาเผาไหม้และนำความร้อนไปผลิตเป็นไอน้ำ จะช่วยลดปริมาณไอน้ำที่ต้องการในระบบได้ รวมถึงไอน้ำที่เกิดขึ้นหากมีปริมาณมากพอจะสามารถนำไปใช้ปั่นไฟฟ้าใช้ในระบบได้อีกด้วย

ในขั้นการผลิตไบโอดีเซลของกรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลผ่านกระบวนการทั่วไปจะทำให้ได้ไบโอดีเซลปริมาณน้อยและผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ จึงจำเป็นต้องทำที่ภาวะเหนือวิกฤตเพื่อช่วยให้ร้อยละการเปลี่ยน (Conversion) เพิ่มขึ้น และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้ลดปริมาณสารเคมีที่ต้องการในระบบได้ ส่วนการผลิตไบโอดีเซลของกรณีศึกษาที่ 6 เป็นแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั่วไปแบบเดียวกับกรณีศึกษาที่ 4 มีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้กรดฟอสฟอริกในการแยก ทำให้วิธีนี้มีการใช้สารเคมีปริมาณค่อนข้างมาก

ภาพที่ 4.22 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอแอลกอฮอล์ในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6



ภาพที่ 4.23 การกระจายตัวของเอเมอร์จีในขั้นการผลิตไบโอดีเซลในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6



ตารางที่ 4.53 ดัชนีความยั่งยืนของระบบในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6

รายการ	หน่วย	กรณีศึกษาที่ 5	กรณีศึกษาที่ 6
รวมทั้งระบบ			
รวมทรัพยากรนำเข้า, F_T	sej/ha/yr	7.10E+15	1.01E+16
รวมค่าแรงและค่าใช้จ่าย, S_T	sej/ha/yr	4.86E+15	4.35E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนได้, $R_T = R_L + R_A + R_B$	sej/ha/yr	3.19E+15	3.14E+15
รวมทรัพยากรที่หมุนเวียนไม่ได้, $N_T = N_L + N_A + N_B$	sej/ha/yr	1.24E+16	1.49E+16
รวมเอเมอร์จีทั้งระบบ, $Y_T = Y_A + Y_B$	sej/ha/yr	1.56E+16	1.81E+16
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (รวม L&S)	sej/J	1.29E+05	1.02E+05
ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล (ไม่รวม L&S)	sej/J	8.89E+04	7.75E+04
EYR ของไบโอดีเซล = $Y_T / (F_T + S_T)$		1.31	1.25
ELR ของไบโอดีเซล = N_T / R_T		3.90	4.76
ESI ของไบโอดีเซล = EYR / ELR		0.34	0.26

4.4.3 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4.54 แสดงข้อมูลของงานวิจัยในประเทศต่างๆได้แก่ งานวิจัยในประเทศมาเลเซีย วิเคราะห์เอเมอร์จีของการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งประกอบด้วยไบโอดีเซลและเอทานอลด้วยน้ำมันปาล์ม งานวิจัยในประเทศจีน วิเคราะห์เอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันสบู่ดำ และประเทศบราซิล วิเคราะห์เอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันถั่วเหลือง ในประเทศมาเลเซียเป็นประเทศที่อยู่ในเขตร้อนชื้นมีปริมาณฝนตกชุกและทรัพยากรที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์ ทำให้ใช้ทรัพยากรในระบบได้อย่างเต็มที่ สัดส่วนเอเมอร์จีที่หมุนเวียนได้ของแรงงานและค่าใช้จ่ายในประเทศมาเลเซียนี้จึงสูงถึงร้อยละ 25 ปริมาณทรัพยากรในระบบที่หมุนเวียนได้จึงสูงกว่าประเทศไทย และเนื่องจากดินในประเทศมาเลเซียมีอินทรียวัตถุสูง ช่วยลดความต้องการปุ๋ยในการปลูกปาล์มได้มาก ESI ของปาล์มน้ำมันในประเทศมาเลเซียจึงสูงถึง 1.49 ซึ่งถือว่าค่อนข้างยั่งยืน ส่วนเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตได้มีทั้งไบโอดีเซล

และเอทานอล ซึ่งมีการนำเข้าทรัพยากรที่ไม่หมุนเวียนได้ปริมาณมาก ทำให้ ESI ลดลงมาเหลือ 0.35 แต่ยังถือว่าสูงกว่าการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทย ส่วนกรณีงานวิจัยของประเทศจีนซึ่งใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นสารตั้งต้นผลิตไบโอดีเซล งานวิจัยนี้คำนวณรวมขั้นการปลูกและผลิตไบโอดีเซลเข้าด้วยกัน ทำให้พิจารณาขั้นการปลูกได้ค่อนข้างยาก ได้ ESI ของการผลิตไบโอดีเซลมีค่า 0.36 งานวิจัยของประเทศบราซิล ซึ่งเป็นประเทศที่มีทรัพยากรค่อนข้างอุดมสมบูรณ์เช่นเดียวกับมาเลเซีย ส่วนใหญ่ใช้ทรัพยากรในระบบ ทำให้มี EYR ค่อนข้างสูง และมี ELR ต่ำ ทำให้ได้ ESI สูงถึง 0.72

ตารางที่ 4.54 ดัชนีความยั่งยืนของระบบในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6

รายการ	หน่วย	งานวิจัย ประเทศมาเลเซีย [1]	งานวิจัย ประเทศจีน [43]	งานวิจัย ประเทศบราซิล [44]
สัดส่วนเอเมอร์จีหมุนเวียนได้ใน L&S		25%[ก]	10%[ข]	49%[ก]
สัดส่วนเอเมอร์จีหมุนเวียนไม่ได้ใน L&S		75%[ก]	90%[ข]	51%[ก]
ขั้นการปลูก				
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลตั้งต้น (รวม L&S)	sej/J	3.68E+04		1.01E+05
ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลตั้งต้น (ไม่รวม L&S)	sej/J	1.63E+04		
EYR ของชีวมวลตั้งต้น = Y_A / (F_A + S_A)		1.58		1.80
ELR ของชีวมวลตั้งต้น = N_A / R_A		1.06		1.81
ESI ของชีวมวลตั้งต้น = EYR / ELR		1.49		0.99
ขั้นการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ				
ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงชีวภาพ (รวม L&S)	sej/J	4.92E+05	3.95E+05	3.90E+05
ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิงชีวภาพ (ไม่รวม L&S)	sej/J	1.17E+05	2.77E+05	
EYR ของเชื้อเพลิงชีวภาพ = Y_T / (F_T + S_T)		1.05	1.91	1.62
ELR ของเชื้อเพลิงชีวภาพ = N_T / R_T		3.02	5.24	2.26
ESI ของเชื้อเพลิงชีวภาพ = EYR / ELR		0.35	0.36	0.72

[ก] ข้อมูลในงานวิจัยเมื่อปี 2543

[ข] ข้อมูลในงานวิจัยเมื่อปี 2537

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันสบู่ดำ พบว่ากระบวนการที่มีอยู่ในประเทศไทยจำเป็นต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อลดปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยแบ่งการประเมินเอเมอร์จีออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยมีกรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 ส่วนที่สองได้จากแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม ASPEN PLUS® มีกรณีศึกษาที่ 4 5 และ 6

5.1.1 ผลการประเมินเอเมอร์จีของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย

กรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเหมือนกัน แต่เปรียบเทียบขนาดของระบบ กรณีที่ 1 เป็นระบบขนาดต้นแบบ ส่วนกรณีศึกษาที่ 2 เป็นระบบขนาดอุตสาหกรรม จากการเปรียบเทียบผลการประเมินเอเมอร์จีของสองกรณีศึกษาพบว่ากรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นระบบต้นแบบมีขนาดเล็ก ทำให้ควบคุมความร้อนของระบบได้ด้วยไฟฟ้า ในขณะที่ระบบอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่ ความร้อนในระบบจึงไม่สามารถควบคุมด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวได้ จำเป็นต้องใช้ไอน้ำปริมาณมาก ส่วนปริมาณสารเคมีที่ใช้ในระบบ กรณีศึกษาที่ 1 ไม่มีส่วนหมุนเวียนสารกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องการสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 2 และนอกจากนี้ในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นระบบขนาดอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิตสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบขนาดต้นแบบต่ำกว่าระบบขนาดอุตสาหกรรมประมาณ 1.15 เท่า ทำให้สามารถลดแรงงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในระบบลงได้ส่วนหนึ่ง

ผลเปรียบเทียบดัชนีความยั่งยืนในระบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มขนาดต้นแบบและขนาดอุตสาหกรรม พบว่าระบบขนาดอุตสาหกรรมซึ่งมีกำลังการผลิตสูงกว่าระบบขนาดต้นแบบทำให้มีค่าทรานส์ฟอร์มิตีต่ำกว่าระบบขนาดต้นแบบ แต่ระบบขนาดอุตสาหกรรมสร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อม (ELR) ค่อนข้างสูงเนื่องจากปริมาณไอน้ำที่ใช้ไปในระบบ คิดเป็นดัชนีเท่ากับ 4.43 สูงกว่าระบบขนาด

ต้นแบบซึ่งมีค่า 3.92 และดัชนีความยั่งยืน (ESI) ของระบบขนาดอุตสาหกรรมมีค่า 0.30 ต่ำกว่าระบบขนาดต้นแบบซึ่งมีค่า 0.35

กรณีศึกษาที่ 3 เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันสบู่ดำในระบบขนาดต้นแบบ ซึ่งจะนำมาเปรียบกับกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นระบบขนาดเดียวกัน และข้อมูลในขั้นการผลิตไบโอดีเซลจากแหล่งเดียวกัน โดยทั้งสองกรณีจะเปรียบเทียบในขั้นการปลูก เพื่อดูผลกระทบของทรัพยากรที่ใช้ไปในการผลิตน้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ผลการประเมินเอเมอร์จีระหว่างสองระบบนี้พบว่าสบู่ดำได้ผลผลิตต่ำกว่าปาล์มน้ำมัน ซึ่งทำให้การใช้แรงงานและค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง สาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะข้อมูลในส่วนนี้มีความผันผวนค่อนข้างมาก ส่วนปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในระบบสบู่ดำสูงกว่าระบบปาล์มน้ำมันเนื่องจากในระบบปาล์มน้ำมันมีการนำกากเหลือจากการหีบน้ำมันกลับมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ ทำให้ช่วยลดปริมาณปุ๋ยได้ค่อนข้างมาก และ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบสบู่ดำต่ำกว่าระบบปาล์มน้ำมัน 1.27 เท่าทำให้ระบบสบู่ดำมีค่าทรานส์ฟอร์มิตีสูงกว่าระบบปาล์มน้ำมัน

เปรียบเทียบดัชนีความยั่งยืนระหว่างกรณีศึกษาที่ 1 และ 3 ระบบสบู่ดำ สร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อม (ELR) คิดเป็นดัชนีเท่ากับ 5.16 สูงกว่าระบบปาล์มน้ำมันซึ่งมีค่า 3.92 ดัชนีความยั่งยืน (ESI) ของระบบสบู่ดำมีค่า 0.24

5.1.2 ผลการประเมินเอเมอร์จีของแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กรณีที่ 4 เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อเปรียบผลที่เกิดจากแบบจำลองกระบวนการและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดอุตสาหกรรมในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งพบว่าแบบจำลองในกรณีศึกษาที่ 4 มีการใช้น้ำหล่อเย็นควบคุมระบบ และใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่ระบบ แต่เนื่องจากแบบจำลองมีการควบคุมระบบค่อนข้างอุดมคติ สามารถดึงความร้อนจากทุกๆส่วนมาใช้ได้ ทำให้มีการใช้ไอน้ำและปริมาณไฟฟ้าน้อยกว่ากระบวนการจริง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นอาจเป็นไปได้ยาก

เปรียบเทียบดัชนีความยั่งยืนระหว่างแบบจำลองกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 4 กับกระบวนการจริงกรณีที่ 2 ในกรณีศึกษาที่ 4 มีการสร้างภาระต่อสิ่งแวดล้อม (ELR) คิดเป็นดัชนีเท่ากับ 3.93 ต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีค่า 4.43 ดัชนีความยั่งยืน (ESI) ของแบบจำลองมีค่า 0.35

กรณีศึกษาที่กล่าวมามีการใช้สารเคมีไปค่อนข้างมาก ดังนั้นหากสามารถลดสารเคมีส่วนหนึ่งที่นำเข้ามาในระบบได้อาจจะช่วยเพิ่มความยั่งยืนให้กับระบบ สมมุติฐานนี้จึงนำมาซึ่งกรณีศึกษาสองกรณี ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 5 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากแอลกอฮอล์ในระบบ โดยผลิต

เอทานอลจากกากปาล์มที่ได้หลังจากการหีบน้ำมันผ่านกระบวนการหมัก และกรณีศึกษาที่ 6 แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากแอลกอฮอล์ในระบบ โดยผลิตเมทานอลจากกากปาล์มผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันและฟิชเชอร์ทรอปช์ ทั้งสองกรณีมีการใช้เอเมอร์จีต่างกัน โดยกรณีศึกษาที่ 5 มีการใช้สารเคมีและมีแรงงานและค่าใช้จ่ายสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 6 ส่วนกรณีศึกษาที่ 6 มีการใช้ไฟฟ้าและไอน้ำสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 5 และเมื่อนำมาคำนวณดัชนีความยั่งยืนพบว่ากรณีศึกษาที่ 5 มีดัชนีความยั่งยืนเท่ากับ 0.34 สูงกว่ากรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งมีค่า 0.22

การพัฒนากรณีศึกษาที่ 6 โดยเพิ่มส่วนผลิตไฟฟ้าและไอน้ำเข้ามาได้เป็นกรณีศึกษาที่ 7 ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนให้ระบบสูงขึ้นเป็น 0.52

5.2 **ข้อเสนอแนะ**

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินเอเมอร์จีของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย และสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นแนวทางสำหรับพัฒนาระบบจริงที่มี ซึ่งมีข้อจำกัดและแนวทางปรับปรุงดังนี้

ข้อจำกัดสำหรับงานวิจัยนี้

- ข้อมูลจากขั้นการปลูก การหีบน้ำมัน ไปจนถึงการผลิตไบโอดีเซลมาจากคนละแหล่งข้อมูล ซึ่งทำให้เส้นทางการผลิตคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้
- ข้อมูลแต่ละแหล่งมาจากคนละปีพ .ศ. ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากในเรื่องค่าแรงและค่าใช้จ่ายในระบบ เนื่องจากค่าเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปทุกๆปี
- แหล่งข้อมูลมีน้อย จึงยากที่จะใช้ข้อมูลนี้เป็นตัวแทนของระบบทั้งประเทศ

แนวทางปรับปรุง

- หากเป็นไปได้ควรใช้ข้อมูลจากเส้นทางเดียว โดยเริ่มที่การเก็บข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้มาตรฐาน หลังจากนั้นสอบถามถึงแหล่งที่มาของน้ำมันพืชที่โรงงานนั้นใช้ และเลือกเก็บข้อมูลจากแหล่งนั้น เพื่อให้ข้อมูลทั้งหมดได้เส้นทางจริง
- เพิ่มจำนวนกลุ่มตัวอย่าง โดยมีกรณีที่โรงงานมีมาตรฐานดีมากจนถึงปานกลาง เพื่อให้สามารถใช้เป็นตัวแทนโรงงานส่วนมากของประเทศไทยได้

นอกจากนี้ในกรณีศึกษาที่ 2 ข้อมูลจากแหล่งที่มาไม่ได้กล่าวถึงวิธีการผลิตไอน้ำที่นำมาใช้ในระบบ แต่บอกมาเป็นปริมาณไอน้ำที่ต้องการ ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะใช้ถ่านหินหรือแก๊สธรรมชาติมาเผาและผลิตไอน้ำใช้ในระบบ การคำนวณเอเมอร์จีในระบบนี้จึงจำเป็นต้องสมมุติให้ไอน้ำในกระบวนการนี้ผลิตจากแก๊สธรรมชาติซึ่งจะมีค่าทรานส์ฟอร์มิตีเท่ากับ 1.30×10^{9} sej/g [34] ซึ่งหากกระบวนการผลิตไอน้ำต่างกันจะมีทรานส์ฟอร์มิตีของไอน้ำไม่เท่ากัน และส่งผลอย่างมากต่อการคำนวณเอเมอร์จีและความยั่งยืนของระบบที่ได้ ยกตัวอย่าง กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังในประเทศจีน มีการใช้ถ่านหินในการผลิตไอน้ำโดยเฉพาะ ซึ่งจะคำนวณเอเมอร์จีส่วนนี้โดยคูณปริมาณถ่านหินที่ใช้กับทรานส์ฟอร์มิตีของถ่านหิน [45] หรือกระบวนการผลิตไอน้ำด้วยชีวมวลของ Sha Sha [46] ทำให้ทรานส์ฟอร์มิตีของไอน้ำมีค่า 1.62×10^{4} sej/J เมื่อเทียบกับไฟฟ้าซึ่งมีทรานส์ฟอร์มิตีเท่ากับ 3.36×10^{5} sej/J [2] แล้วถือว่าต่ำกว่ามาก

รายการอ้างอิง

[1] Goh, C. S., Lee, K. T., Palm-based biofuel refinery (PBR) to substitute petroleum refinery: An energy and emergy assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 14 (2010): 2986-2995.

[2] Odum, H., Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decisionmaking. New York, USA: Wiley, 1996.

[3] Baral, A., Bakshi, B.R., Emergy analysis using US economic input–output models with applications to life cycles of gasoline and corn ethanol. Ecological Modelling Volume 221 (2010): 1807-1818.

[4] Dong, X., Ulgiati, S., Yan, M., Zhang, X., Gaoet, W., Energy and eMergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China. Energy Policy Volume 36 (2008): 3882-3892.

[5] Hall, Charles A.S. "EROI: definition, history and future implications" (PowerPoint), [Online]. Available: http://www.esf.edu/efb/hall/talks/EROI6a.pdf [2011,July 3]

[6] Demirbas, A., Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. Energy Conversion and Management Volume 49 (2008): 2106-2116.

[7] โครงการจัดระบบฐานข้อมูลพลังงานเพื่อการวิเคราะห์และวางแผนยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศ [Online]. Available:http://www.thaienergydata.in.th/econtent/upload_pic/1190645300.pdf. [2011,July 3]

[8] LDD (The Land Development Department). Planning and land use Section 1. The Land Development Department, Bangkok, Thailand; 2004.

[9] DFC (The Department of Farm Crop). Oil palm. Economic fauna, Kasetsart University, Thailand; 1999.

[10] Pleanjai, S., Gheewala, S.H., Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. Applied Energy Volume 86 (2009). Supplement 1(0): S209-S214.

[11] West, T.O., Marland, G. A., System of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flex in agriculture: comparing tillage practices in the United States. Agr Ecosyst Environ Volume 91 (2002): 217–32.

[12] Klubchum, C., The efficiency evaluation of industrial scale biodiesel. Chiang Mai University; 2006.

[13] Tippayawong, N., Pittayapak, A., Jompakdee, W., Analysis of energy requirement for vegetable oil production in Northern Thailand's Farms. CMU J (2003) : 2179–2185.

[14] Chavalparit, O., Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand. Ph.D. Dissertation, 2006.

[15] PORIM (Palm Oil Research Institute of Malaysia). Palm oil factory process handbook. Part 1. Ministry of Primary Industries, Malaysia; 1985.

[16] Cao, K., Feng X., The emergy analysis of loop circuit. Environmental Monitoring and Assessment 2008;147:243–51.

[17] Gonsalves, J.B., An assessment of the biofuels industry in Thailand. in the United Nations Conference on Trade and Development. 2006. Geneva.

[18] Prueksakorn, K., Gheewala, S.H., Full Chain Energy Analysis of Biodiesel from Jatropha curcas L. in Thailand. Environmental Science & Technology Volume 42 (2008): 3388-3393.

[19] Harwood, H. J., Oleochemicals as a fuel: Mechanical and economic feasibility. JAOCS Volume 61 (1984): 315–324.

[20] Putsche, R.J., Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components, in NREL, NREL/MP-425-20685, Editor. April 1996.

[21] The National Environmental Accounting Database (NEAD) [Online]. Available: http://sahel.ees.ufl.edu/database_resources.php [2011, June]

[22] Solar Radiation Maps of Thailand;1999. [Online]. Available: http://www2.dede.go.th/renew/sola/mapmenu.html [2011,July]

[23] Thai Meteorological Department; 2010. [Online]. Available: http://www.tmd.go.th/index.php [2011,July]

[24] Brown, M.T. and S. Ulgiati, Emergy Analysis and Environmental Accounting, in Encyclopedia of Energy, New York: Elsevier, 2004.

[25] Thinley, S.O.a.U. Spatial modeling for soil erosion assessment in upper lam phra phloeng watershed. SUT-Graduate Conference Thailand: Suranaree J. Sci. Technol. 2009.

[26] เกษมศรี ซับซ้อน. ปฐพีวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 4. นานาสิ่งพิมพ์. กรุงเทพฯ. 2541.

[27] Cohen, M.J., Brown, M.T., Shepherd, K.D., Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis. Agriculture Ecosystems and Environment Volume 114 (2006): 249–269.

[28] International Energy Agency. Energy price & taxes. 1st Quarter 2006-455;2006. [Online]. Available:http://data.iea.org/ieastore/asserts/products/eptnotes/ Thailand.pdf [2011,June]

[29] Zhang, G., Long, W., A key review on emergy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future. Energy Policy Volume 38 (2010): 2948-2955.

[30] Prasertsan, S., Sajjakulnukit, B., Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers. Renewable Energy, Volume 31(2006): 599-610.

[31] Woods, J., Tipper, R., Brown, G., Diaz-Chavez, R., Lovell, J., Groot, P., Sustainability of Co-firing in UK (report for the DTI), September; 2006.

[32] Najmi, W.A., Abdullah, N.R., Combustion Characteristics of Palm Shells and Palm Fibers Using an Inclined Grate Combustor. Journal of Mechanical Engineering, 2011.

[33] Abdullah, N., Gerhauser H., Characterisation of Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel Application. Journal of Physical Science Volume 22 (2011).

[34] Bastianoni, S., Campbell, D. E., Ridolf, R., Pulselli, F.M., The solar transformity of petroleum fuels. Ecological Modelling Volume 220 (2009): 40-50.

[35] Gheewala, S.H., Energy and Greenhouse Gas Implications of Biodiesel Production from Jatropha curcas L. in The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006). 2006.

[36] Prueksakorn, K., Gheewala, S.H, Malakul, P., Bonnet, S., Energy analysis of Jatropha plantation systems for biodiesel production in Thailand. Energy for Sustainable Development, 2010. 14(1): p. 1-5.

[37] Che Man, Y.B., Haryati, T., Ghazali, H.M., and Asbi, B.A., Composition and thermal profile of crude palm oil and its products. Journal of the American Oil Chemists' Society Volume 76 (1999): 237-242.

[38] Kerdsuwan, K.L., Renewable Energy from Palm Oil Empty Fruit Bunch, Renewable Energy - Trends and Applications. ISBN: 978-953-307-939-4, [Online]. Available:http://www.intechopen.com/books/renewable-energy-trends-and-applications/renewable-energy-from-palm-oil-empty-fruit-bunch [2011,July 3]

[39] Zhang, Y., Dubé, M.A., McLean, D.D., Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. Bioresource Technology Volume 89 (2003): 1-16.

[40] Van, J., Gerpen, B.S., Pruszko, R., Biodiesel Production Technology, in NREL, NREL/SR-510-36244, Editor. July 2004.

[41] Narváez, P., Rincón, S., Sánchez, F., Kinetics of Palm Oil Methanolysis. Journal of the American Oil Chemists' Society Volume 84 (2007): 971-977.

[42] Aden, A., Ibsen, K., Jechura, K., Neeves, K., Sheehan, J., Wallace, B., Lignocellulosic Biomass to Ethanol Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover., in NREL, NREL/TP-510-32438, Editor. 2002.

[43] Ju, L.P., Chen, B., Embodied energy and emergy evaluation of a typical biodiesel production chain in China. Ecological Modelling Volume 222 (2011): 2385-2392.

[44] Cavalett, O., Ortega, E., Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. Journal of Cleaner Production Volume 18 (2010): 55-70.

[45] Yang, H., Chen, L., Yan, Z., Wang, H., Emergy analysis of cassava-based fuel ethanol in China. Biomass and Bioenergy Volume 35 (2011): 581-589.

[46] Sha Sha, M.L., Hurme, M., Renewable Energy Based Environmental Accounting of Heat Power and Steel Production, Aalto University, [Online]. Available: http://www.aidic.it/pres11/webpapers/129Sha.pdf [2011,July]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การคำนวณและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

รหัส	รายการ	ชนิด	แรงม้า	จำนวน ชม.ใช้งาน/วัน		ค่าใช้จ่าย (บาท/วัน)
	<u>ประเภทปั๊ม</u>					
PCT-01	chemical pump	centrifugal	0.37 kw	7 ชม.	2590	7.7182
PCT-02		centrifugal	0.37 kw	7 ชม.	2590	7.7182
PTT-01	Treatment pump	Gear	3.7 kw	16 ชม.	59200	176.416
PTT-01		Gear	3.7 kw	16 ชม.	59200	176.416
PMT-01	Mixing Pump	Gear	1.5 kw	5 ชม.	7500	22.35
RP-01	Reactor Pump	centrifugal	1.5 kw	18 ชม.	27000	80.46
RP-02		centrifugal	1.5 kw	16 ชม.	24000	71.52
BTP-01		**centrifugal**	**0.37 kw**	**10 ชม.**	**3700**	**11.026**
BTP-02		centrifugal	0.37 kw	10 ชม.	3700	11.026
BTP-03	Buffer Pump	centrifugal	0.37 kw	10 ชม.	3700	11.026
BTP-04		Gear	1.50 kw	10 ชม.	15000	44.7
BTP-05		centrifugal	0.37 kw	10 ชม.	3700	11.026
BTP-06		centrifugal	0.37 kw	10 ชม.	3700	11.026
GP-01	Glycerine Pump	Gear	1.50 kw	18 ชม.	27000	80.46

ตารางที่ ก.1 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ) (ต่อ)

รหัส	รายการ	ชนิด	แรงม้า	จำนวน ชม.ใช้งาน/วัน		ค่าใช้จ่าย
HTP-01	Heating Pump	centrifugal	1.50 kw	14 ชม.	21000	62.58
FCP-01	Cooling Pump	centrifugal	1.50 kw	13 ชม.	19500	58.11
VP-01	Vacuum Pump	centrifugal	2.2 kw	12 ชม.	26400	78.672
EP-01	Evaporator Pump	centrifugal	0.37 kw	10 ชม.	3700	11.026
ATP-01	Alcohol Pump	centrifugal	0.37 kw	9 ชม.	3330	9.9234
S-01	Separator	centrifugal	2.2 kw	16 ชม.	35200	104.896
S-02		centrifugal	2.2 kw	16 ชม.	35200	104.896
	ประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน					
H1001	TT-01 : Treatment I		9 kw	8 ชม.	72000	214.56
H1002	TT-02 : Treatment II		9 kw	8 ชม.	72000	214.56
H1003	MT-01 : Mixing I		9 kw	6 ชม.	54000	160.92
H1004	MT-02 : Mixing II		9 kw	6 ชม.	54000	160.92
H1005	MT-03 : Mixing II		9 kw	4 ชม.	36000	107.28
H1006	HT-01 : Heating Set		9 kw	6 ชม.	54000	160.92
H1007	HT-02 : Heating Set		9 kw	6 ชม.	54000	160.92

ตารางที่ ก.1 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตไบโอดีเซลขนาดต้นแบบ (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ) (ต่อ)

รหัส	รายการ	ชนิด	แรงม้า	จำนวน ชม.ใช้งาน/วัน		ค่าใช้จ่าย
	ประเภทมอเตอร์และเกียร์					
MC-01	chemical Tank		0.37 kw	6 ชม.	2220	6.6156
MC-02			0.37 kw	6 ชม.	2220	6.6156
MTM-01	Pre-Treatment Tank		2.2 kw	18 ชม.	39600	118.008
MTM-01	Pre-Treatment Tank		2.2 kw	18 ชม.	39600	118.008
MM-01	Mixing Tank		0.37 kw	16 ชม.	5920	17.6416
MM-02			0.37 kw	16 ชม.	5920	17.6416
MM-02			0.37 kw	16 ชม.	5920	17.6416
MR-01	Reactor		1.5 kw	18 ชม.	27000	80.46
MR-02	Reactor		1.5 kw	18 ชม.	27000	80.46
MH-01	Reactor		0.37 kw	16 ชม.	5920	17.6416
MH-02	Reactor		0.37 kw	16 ชม.	5920	17.6416
		จำนวนไฟฟ้าทั้งหมด (W.hrต่อวัน)				950,150.00
		จำนวนเงินทั้งหมด (บาทต่อวัน)				2,831.45

วิธีการคำนวณสำหรับตารางที่ 4.2 และ 4.3

ขั้นการปลูก

1. *แสงอาทิตย์*

รังสีอาทิตย์บนผิวโลก (Insolation)	=	18.2	$MJ/m^2/day$	
	=	6.64×10^{13}	J/ha/yr	
คิดเป็นพลังงาน =		$\underline{6.64 \times 10^{13}}$	J/ha/yr	
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	1	sej/J	(ตามนิยาม)
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*$\underline{6.64 \times 10^{13}}$*	*sej/ha/yr*	

2. *ปริมาณน้ำฝน*

พื้นที่ =		1	ha
ระดับน้ำฝน =		1.49×10^3	mm/yr
ความหนาแน่น =		1.00×10^6	g/m^3
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	4.94	J/g
คิดเป็นพลังงาน =		$1 \times 1.49 \times 4.94 \times 10^3 \times 10^6$	
	=	$\underline{7.37 \times 10^{10}}$	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.06×10^4	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*$\underline{2.26 \times 10^{15}}$*	*sej/ha/yr*

3. อินทรียวัตถุในดิน

อัตราการสูญเสียหน้าดินจากพืชไร่ =		31.4	ton/ha/yr
อัตราส่วนปริมาณอินทรียวัตถุในดิน =		0.013	
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.46×10^{10}	J/ton
คิดเป็นพลังงาน =		$31.4 \times 0.013 \times 1.46 \times 10^{10}$	
	=	$\underline{5.96 \times 10^9}$	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	2.25×10^5	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*$\underline{1.34 \times 10^{15}}$*	*sej/ha/yr*

4. *เมล็ดพันธุ์*

การคำนวณทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของเมล็ดพันธุ์ปาล์มน้ำมัน

การปลูกปาล์มน้ำมันต้องใช้ทรัพยากรดังนี้

1) พลังงานแสงอาทิตย์	6.64×10^{13}	sej/ha/yr (จากข้อ	1.)
2) ฝน	2.26×10^{15}	sej/ha/yr (จากข้อ	2.)
3) อินทรียวัตถุในดิน	1.34×10^{15}	sej/ha/yr (จากข้อ	3.)
4) ปุ๋ยไนโตรเจน	7.65×10^{14}	sej/ha/yr	(จากข้อ 5.)
5) ปุ๋ยฟอสฟอรัส	5.26×10^{12}	sej/ha/yr	(จากข้อ 6.)
6) ปุ๋ยโพแทสเซียม	1.11×10^{14}	sej/ha/yr	(จากข้อ 7.)
7) ยาฆ่าแมลง	1.60×10^{14}	sej/ha/yr	(จากข้อ 8. และ 9.)
รวม	4.70×10^{15}	sej/ha/yr	

ปริมาณเมล็ดพันธุ์ที่ได้	=	17,000	kg/ha/yr
คิดเป็นทรานส์ฟอร์มมิจีจำเพาะ	=	$\underline{2.77 \times 10^{11}}$	sej/kg
พลังงานของเมล็ดพันธุ์	=	0.99	MJ/kg
เมล็ดพันธุ์ที่ใช้	=	168	kg/ha/yr
คิดเป็นพลังงาน	=	$\underline{1.66 \times 10^{ก}}$	J/ha/yr
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{*4.65 \times 10^{13}*}$	*sej/ha/yr*

5. *ปุ๋ยไนโตรเจน*

ปริมาณปุ๋ย = 7.79			kg/ton FFB[ก]
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
กากปาล์มลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนได้ 9.5%			
ปริมาณปุ๋ยที่ใช้	=	<u>119.85</u>	kg/ha/yr

[ก]FFB คือ Fresh fruit bunch หรือผลปาล์มสด

ทรานส์ฟอร์มิตี	=	6.38×10^{12}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{*7.65 \times 10^{14}*}$	*sej/ha/yr*

6. *ปุ๋ยฟอสฟอรัส*

ปริมาณปุ๋ย = 0.05			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
กากปาล์มลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนได้ 5.6%			
ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ =		0.80	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	6.55×10^{12}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*5.26×10^{12}*	*sej/ha/yr*

7. *ปุ๋ยโพแทสเซียม*

ปริมาณปุ๋ย = 14.41			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
กากปาล์มลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนได้ 75.4 %			
ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ =		60.26	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	1.85×10^{12}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*1.11×10^{14}*	*sej/ha/yr*

8. *ยาฆ่าแมลง ไกลโฟเสต (glyphosate)*

ปริมาณไกลโฟเสต = 0.28			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
ปริมาณไกลโฟเสตที่ใช้ =		4.76	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	2.48×10^{13}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*4.22×10^{13}*	*sej/ha/yr*

9. *ยาฆ่าแมลง พาราควอต (paraquat)*

ปริมาณพาราควอต = 0.1			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
ปริมาณพาราควอตที่ใช้ =		1.7	kg/ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 2.48×10^{13} sej/kg

คิดเป็นเอเมอร์จี = $\underline{1.18 \times 10^{14}}$ *sej/ha/yr*

10. *น้ำมันดีเซล*

ขนส่งผลปาล์มสด จากสวนปาล์มไปยังโรงงานหีบน้ำมัน

ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17 ton FFB/ha/yr

ความจุรถบรรทุก = 3,000 kg/round

ระยะทาง = 56 km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 17,000 x 56 x 0.832 / (3,000 x 1.628)

= 194.92 kg/ha/yr

ขนส่งสารเคมีที่ใช้ในขั้นการปลูก จากบริษัทไปยังแหล่งปลูก

ปริมาณปุ๋ยและยาฆ่าแมลง = 187.37 kg/ha/yr

ความจุรถบรรทุก = 3,000 kg/round

ระยะทาง = 20 km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 187.37 x 20 x 0.832 / (3,000 x 1.628)

= 0.64 kg/ha/yr

รวมปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ขนส่ง = $\underline{162.81}$ kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 4.184×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $162.81 \times 4.184 \times 10^{7}$

= $\underline{6.81 \times 10^{9}}$ J/ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 1.10×10^{5} sej/J

คิดเป็นเอเมอร์จี = $\underline{7.49 \times 10^{14}}$ *sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

11. *ค่าแรง*

ค่าจ้างใส่ปุ๋ย = 72	baht/rai/yr	=	14.54 $/	ha/yr
ค่าตัดแต่งทางใบ = 280	baht/rai/yr	=	56.53 $/	ha/yr
ค่ากำจัดวัชพืช = 260	baht/rai/yr	=	52.49 $/	ha/yr
ค่าเก็บเกี่ยวทะลาย = 1,080	baht/rai/yr	=	218.03 $/	ha/yr
รวม ค่าแรงและการจัดการ		=	341.57 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$	
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*1.26×10^{15}*	*sej/ha/yr*	

12. *ค่าจ้างอื่นๆ* = 720 baht/rai/yr = 145.35 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*5.38×10^{14}*	*sej/ha/yr*

13. *ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์* = 120 baht/rai/yr = 24.23 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*8.96×10^{13}*	*sej/ha/yr*

การหีบน้ำมัน

14. *ไฟฟ้า*

ปริมาณไฟฟ้า = 2.57			kWh/ton FFB
= 9.25		E+06	J/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
= 1.57		E+08	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.36×10^{5}	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*5.28×10^{13}*	*sej/ha/yr*

15. *น้ำมันดีเซล (สำหรับเดินเครื่อง)*

ปริมาณน้ำมันดีเซล = 0.189			L/ton FFB
= 0.157			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
= 2.672			kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	4.184×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$0.189 \times 4.184 \times 10^{7}$	
	=	$\underline{1.12 \times 10^{8}}$	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.36×10^{5}	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{1.23 \times 10^{13}}$	*sej/ha/yr*

16. *น้ำหล่อเย็น*

ปริมาณน้ำ = 0.858			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
= 14.582			kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	2.03×10^{8}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{2.96 \times 10^{9}}$	*sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

17. *ค่าแรง*

ค่าแรงต่อตันของผลปาล์ม = 55			baht/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
ค่าแรง =		30.2 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{1.12 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

18. *ค่าบำรุงรักษา*

ค่าบำรุงรักษาต่อตันของผลปาล์ม = 91.7			baht/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
ค่าบำรุงรักษา =		50.4 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*1.86×10^{14}*	*sej/ha/yr*

19. *ค่าเสื่อมราคา*

ค่าเสื่อมราคาต่อตันของผลปาล์ม = 83.3			baht/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
ค่าเสื่อมราคา =		45.7 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*1.69×10^{14}*	*sej/ha/yr*

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด = 178			kg/ton FFB
ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก = 17			ton FFB/ha/yr
น้ำมันปาล์ม =		3026.0	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	4.014×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$3026 \times 4.014 \times 10^{7}$	
	=	1.21×10^{11}	J/ha/yr

กากเหลือ (Residues)

เนื้อเมล็ด

เนื้อเมล็ดที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด = 55			kg/ton FFB
เนื้อเมล็ด = 935.0			kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.7×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$55 \times 1.7 \times 10^{7}$	
	=	$\underline{1.59 \times 10^{10}}$	J/ha/yr

เปลือก

เปลือกที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด = 55 kg/ton FFB

เปลือก = 935.0 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.846×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$55 \times 1.846 \times 10^{7}$	
	=	$\underline{1.73 \times 10^{10}}$	J/ha/yr

เส้นใยปาล์ม

เส้นใยปาล์มที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด = 140 kg/ton FFB

เส้นใยปาล์ม = 2380.0 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	9.2×10^{6}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$2380 \times 9.2 \times 10^{6}$	
	=	$\underline{2.19 \times 10^{10}}$	J/ha/yr

ทะลายเปล่า

ทะลายที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด = 230 kg/ton FFB

ทะลายเปล่า = 3910.0 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$8160 \times 1 \times 10^{7}$	
	=	$\underline{3.91 \times 10^{10}}$	J/ha/yr

รวมชีวมวลปาล์ม =		11,186	kg/ha/yr
	=	$\underline{2.16 \times 10^{11}}$	J/ha/yr

การคิดทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (รวม L&S) = $\underline{7.92 \times 10^{15}}$ *sej/ha/yr*

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S) = $\underline{5.57 \times 10^{15}}$ *sej/ha/yr*

ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม

แบบรวม L&S = $(7.92 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / $(1.21 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= $\underline{6.52 \times 10^{4}}$ sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(5.57 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / $(1.21 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= $\underline{4.58 \times 10^{4}}$ sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของน้ำมันปาล์ม

แบบรวม L&S = $(7.92 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / (3026 kg/ha/yr)

= $\underline{2.62 \times 10^{12}}$ sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(5.57 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / (3026 kg/ha/yr)

= $\underline{1.84 \times 10^{12}}$ sej/kg

ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม

แบบรวม L&S = $(7.92 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / $(2.16 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= $\underline{3.67 \times 10^{4}}$ sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(5.57 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / $(2.16 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= $\underline{2.58 \times 10^{4}}$ sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของชีวมวลปาล์ม

แบบรวม L&S = $(7.92 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / (11,186 kg/ha/yr)

= $\underline{7.08 \times 10^{11}}$ sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(5.57 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / (11,186 kg/ha/yr)

= $\underline{4.98 \times 10^{11}}$ sej/kg

วิธีการคำนวณสำหรับตารางที่ 4.4 และ 4.5

ขั้นการผลิตไบโอดีเซล (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

1. *เมทานอล*

ปริมาณเมทานอล	=	424.37	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	7.23×10^{9}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{3.07 \times 10^{15}}$	*sej/ha/yr*

2. *โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)*

ปริมาณ KOH	=	3.46	$/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{1.28 \times 10^{13}}$	*sej/ha/yr*

3. *เรซิน*

ปริมาณเรซิน	=	107.33	$/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{3.97 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

4. *ไฟฟ้า*

ปริมาณไฟฟ้า	=	4.58×10^{8}	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.36×10^{5}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{1.54 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

5. *น้ำมันดีเซล*

ขนส่ง น้ำมันปาล์ม จากโรงงานหีบน้ำมันไปยังโรงงานกลั่นน้ำมันดิบ

น้ำมันปาล์มที่ได้จากการปลูก =	2,771	kg/ha/yr
ความจุรถบรรทุก =	20,000	kg/round
ระยะทาง =	1,628	km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 2,771 x 1,628 x 0.832 / (20,000 x 1.628)

= 115.27 kg/ha/yr

ขนส่งสารเคมีที่ใช้ในขั้นการ ผลิตไบโอดีเซล จากบริษัทไปยังโรงงานผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณ สารเคมี = 535.17 kg/ha/yr

ความจุรถบรรทุก = 3,000 kg/round

ระยะทาง = 65 km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 535.17 x 65 x 0.832 / (3,000 x 1.628)

= 5.93 kg/ha/yr

ขนส่งไบโอดีเซล จากโรงงานผลิตไบโอดีเซลไปยังแหล่งขาย

น้ำมันปาล์มที่ได้จากการปลูก = 2,436.2 kg/ha/yr

ความจุรถบรรทุก = 20,000 kg/round

ระยะทาง = 46 km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 2,436.2 x 46 x 0.832 / (20,000 x 1.628)

= 2.86 kg/ha/yr

รวมปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ขนส่ง = 124.06 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 4.184×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $124.06 \times 4.184 \times 10^{7}$

= 5.19×10^{9} J/ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 1.10×10^{5} sej/J

คิดเป็นเอเมอร์จี = *5.71×10^{14}* *sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

6. *ค่าแรง*

ค่าแรง =		135.03 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*5.00×10^{14}*	*sej/ha/yr*

7. *ค่าบำรุงรักษา*

ค่าบำรุงรักษา =		149.42 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*5.53×10^{14}*	*sej/ha/yr*

8. *ค่าเสื่อมราคา*

ค่าเสื่อมราคา =		17.86 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*6.61×10^{14}*	*sej/ha/yr*

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้ =		2436.19	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	3.81×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$2436.19 \times 3.81 \times 10^{7}$	
	=	9.27×10^{10}	J/ha/yr

กลีเซอรอล

กลีเซอรอลที่ได้ =		438.51	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.9×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$438.51 \times 1.9 \times 10^{7}$	
	=	8.33×10^{9}	J/ha/yr

รวมเชื้อเพลิงที่ได้ = 2874.70 kg/ha/yr

= 1.01×10^{11} J/ha/yr

การคิดทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (รวม L&S) = 1.32×10^{16} *sej/ha/yr*

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S) = 9.77×10^{15} *sej/ha/yr*

ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล

แบบรวม L&S = $(1.32 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(9.27 \times 10^{10}$ J/ha/yr)

= 1.43×10^{5} sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(9.77 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / $(9.27 \times 10^{10}$ J/ha/yr)

= 1.05×10^{5} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของไบโอดีเซล

แบบรวม L&S = $(1.32 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (2436.19 kg/ha/yr)

= 5.44×10^{12} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(9.77 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / (2436.19 kg/ha/yr)

= 4.01×10^{12} sej/kg

ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิง

แบบรวม L&S = $(1.32 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(1.01 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= 1.31×10^{5} sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(9.77 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / $(1.01 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= 9.66×10^{4} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของเชื้อเพลิง

แบบรวม L&S = $(1.32 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (2874.70 kg/ha/yr)

= 5.44×10^{12} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(9.77 \times 10^{15}$ sej/ha/yr) / (2874.70 kg/ha/yr)

= 4.01×10^{12} sej/kg

วิธีการคำนวณสำหรับตารางที่ 4.9 และ 4.10

ขั้นการผลิตไบโอดีเซล

1. *เมทานอล*

ปริมาณเมทานอล	=	303.95	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	7.23×10^{9}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{2.20 \times 10^{15}}$	*sej/ha/yr*

2. *โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)*

ปริมาณ NaOH	=	3.13	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	6.38×10^{9}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{2.00 \times 10^{13}}$	*sej/ha/yr*

3. *ไอน้ำ*

ปริมาณไอน้ำ	=	107.33	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	1.30×10^{9}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{2.77 \times 10^{15}}$	*sej/ha/yr*

4. *น้ำหล่อเย็น*

ปริมาณน้ำหล่อเย็น	=	12,533.9	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	6.64×10^{5}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{8.32 \times 10^{12}}$	*sej/ha/yr*

5. *ไฟฟ้า*

ปริมาณไฟฟ้า	=	2.93×10^{8}	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.36×10^{5}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{9.85 \times 10^{13}}$	*sej/ha/yr*

6. *น้ำมันดีเซล*

ขนส่ง น้ำมันปาล์ม จากโรงงานหีบน้ำมันไปยังโรงงานกลั่นน้ำมันดิบ

น้ำมันปาล์มที่ได้จากการปลูก =	2,771	kg/ha/yr
ความจุรถบรรทุก =	20,000	kg/round
ระยะทาง =	1,628	km/round
ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628		km/L
ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832		kg/L
ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ =	2,771 x 1,628 x 0.832 / (20,000 x 1.628)	
=	115.27	kg/ha/yr

ขนส่งสารเคมีที่ใช้ในขั้นการ ผลิตไบโอดีเซล จากบริษัทไปยังโรงงานผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณ สารเคมี =	307.08	kg/ha/yr
ความจุรถบรรทุก = 3,000		kg/round
ระยะทาง =	65	km/round
ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628		km/L
ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832		kg/L
ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ =	307.08 x 65 x 0.832 / (3,000 x 1.628)	
=	3.40	kg/ha/yr

ขนส่งไบโอดีเซล จากโรงงานผลิตไบโอดีเซลไปยังแหล่งขาย

น้ำมันปาล์มที่ได้จากการปลูก =	2,848.62	kg/ha/yr
ความจุรถบรรทุก =	20,000	kg/round
ระยะทาง =	46	km/round
ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628		km/L
ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832		kg/L
ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ =	2,848.62 x 46 x 0.832 / (20,000 x 1.628)	
=	3.35	kg/ha/yr

รวมปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ขนส่ง =	<u>122.02</u>	kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 4.184×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $122.02 \times 4.184 \times 10^{7}$

= $\underline{5.11 \times 10^{9}}$ J/ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 1.10×10^{5} sej/J

คิดเป็นเอเมอร์จี = $\underline{5.62 \times 10^{14}}$ *sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

7. *ค่าแรง*

ค่าแรง = 69.25 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 3.70×10^{12} sej/$

คิดเป็นเอเมอร์จี = $\underline{2.56 \times 10^{14}}$ *sej/ha/yr*

8. *ค่าบำรุงรักษา*

ค่าบำรุงรักษา = 123.32 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 3.70×10^{12} sej/$

คิดเป็นเอเมอร์จี = $\underline{4.56 \times 10^{14}}$ *sej/ha/yr*

9. *ค่าเสื่อมราคา*

ค่าเสื่อมราคา = 95.81 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 3.70×10^{12} sej/$

คิดเป็นเอเมอร์จี = $\underline{3.54 \times 10^{14}}$ *sej/ha/yr*

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้ = 2484.62 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 3.81×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $2484.62 \times 3.81 \times 10^{7}$

= 1.08×10^{11} J/ha/yr

กลีเซอรอล

กลีเซอรอลที่ได้ = 512.75 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 1.9×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $512.75 \times 1.9 \times 10^{7}$

= 9.74×10^{9} J/ha/yr

รวมเชื้อเพลิงที่ได้ = 3361.37 kg/ha/yr

= 1.18×10^{11} J/ha/yr

การคิดทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (รวม L&S) = 1.46×10^{16} *sej/ha/yr*

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S) = 1.12×10^{16} *sej/ha/yr*

ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล

แบบรวม L&S = $(1.46 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(1.08 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= 1.35×10^{5} sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(1.12 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(1.08 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= 1.03×10^{5} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของไบโอดีเซล

แบบรวม L&S = $(1.46 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (2484.62 kg/ha/yr)

= 5.14×10^{12} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(1.12 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (2484.62 kg/ha/yr)

= 3.94×10^{12} sej/kg

ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิง

แบบรวม L&S = $(1.46 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(1.01 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= $\underline{1.24 \times 10^{5}}$ sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(1.12 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(1.01 \times 10^{11}$ J/ha/yr)

= $\underline{9.49 \times 10^{4}}$ sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของเชื้อเพลิง

แบบรวม L&S = $(1.46 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (3361.37 kg/ha/yr)

= $\underline{4.36 \times 10^{12}}$ sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(1.12 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (3361.37 kg/ha/yr)

= $\underline{3.34 \times 10^{12}}$ sej/kg

วิธีการคำนวณสำหรับตารางที่ 4.14 และ 4.15

ขั้นการปลูก

1. *แสงอาทิตย์*

รังสีอาทิตย์บนผิวโลก (Insolation)	=	18.2	$MJ/m^2/day$	
	=	6.64×10^{13}	J/ha/yr	
คิดเป็นพลังงาน =		$\underline{6.64 \times 10^{13}}$	J/ha/yr	
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	1	sej/J	(ตามนิยาม)
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*$\underline{6.64 \times 10^{13}}$*	*sej/ha/yr*	

2. *ปริมาณน้ำฝน*

พื้นที่ =		1	ha
ระดับน้ำฝน =		1.49×10^3	mm/yr
ความหนาแน่น =		1.00×10^6	g/m^3
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	4.94	J/g
คิดเป็นพลังงาน =		$1 \times 1.49 \times 4.94 \times 10^3 \times 10^6$	
	=	$\underline{7.37 \times 10^{10}}$	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.06×10^4	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*$\underline{2.26 \times 10^{15}}$*	*sej/ha/yr*

3. อินทรียวัตถุในดิน

อัตราการสูญเสียหน้าดินจากพืชไร่ =		31.4	ton/ha/yr
อัตราส่วนปริมาณอินทรียวัตถุในดิน =		0.013	
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.46×10^{10}	J/ton
คิดเป็นพลังงาน =		$31.4 \times 0.013 \times 1.46 \times 10^{10}$	
	=	$\underline{5.96 \times 10^9}$	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	2.25×10^5	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*$\underline{1.34 \times 10^{15}}$*	*sej/ha/yr*

4. *เมล็ดพันธุ์*

การคำนวณทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของเมล็ดพันธุ์ปาล์มน้ำมัน

การปลูกปาล์มน้ำมันต้องใช้ทรัพยากรดังนี้

1) พลังงานแสงอาทิตย์	6.64×10^{13}	sej/ha/yr (จากข้อ	1.)
2) ฝน	2.26×10^{15}	sej/ha/yr (จากข้อ	2.)
3) อินทรียวัตถุในดิน	1.34×10^{15}	sej/ha/yr (จากข้อ	3.)
4) ปุ๋ยไนโตรเจน	6.65×10^{14}	sej/ha/yr	(จากข้อ 5.)
5) ปุ๋ยฟอสฟอรัส	6.82×10^{14}	sej/ha/yr	(จากข้อ 6.)
6) ปุ๋ยโพแทสเซียม	1.93×10^{14}	sej/ha/yr	(จากข้อ 7.)
7) ยาฆ่าแมลง	4.94×10^{10}	sej/ha/yr	(จากข้อ 8. และ 9.)
รวม	5.20×10^{15}	sej/ha/yr	

ปริมาณเมล็ดพันธุ์ที่ได้	=	8,750	kg/ha/yr
คิดเป็นทรานส์ฟอร์มมิจีจำเพาะ	=	$\underline{5.95 \times 10^{11}}$	sej/kg
เมล็ดพันธุ์ที่ใช้	=	825	kg/ha/yr
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{4.91 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

5. *ปุ๋ยไนโตรเจน*

ปริมาณปุ๋ยที่ใช้	=	104.2	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	6.38×10^{12}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{6.65 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

6. *ปุ๋ยฟอสฟอรัส*

ปริมาณปุ๋ยที่ใช้	=	104.2	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	6.55×10^{12}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{6.82 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

7. *ปุ๋ยโพแทสเซียม*

ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ =		104.2	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	1.85×10^{12}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	1.93×10^{14}	*sej/ha/yr*

8. *ยาฆ่าแมลง ไกลโฟเสต (glyphosate)*

ปริมาณไกลโฟเสตที่ใช้ =		0.00144	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	2.48×10^{13}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	3.57×10^{10}	*sej/ha/yr*

9. *ยาฆ่าแมลง พาราควอต (paraquat)*

ปริมาณพาราควอตที่ใช้ =		0.00055	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	2.48×10^{13}	sej/kg
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	1.37×10^{10}	*sej/ha/yr*

10. *น้ำมันดีเซล*

ขนส่งผลปาล์มสด จากสวนปาล์มไปยังโรงงานหีบน้ำมัน

ผลปาล์มสดที่ได้จากการปลูก =	8750	kg FFB/ha/yr
ความจุรถบรรทุก = 3,000		kg/round
ระยะทาง = 56		km/round
ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628		km/L
ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832		kg/L
ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ =	8,750 x 56 x 0.832 / (3,000 x 1.628)	
=	83.47	kg/ha/yr

ขนส่งสารเคมีที่ใช้ในขั้นการปลูก จากบริษัทไปยังแหล่งปลูก

ปริมาณปุ๋ยและยาฆ่าแมลง =	312.50	kg/ha/yr
ความจุรถบรรทุก = 3,000		kg/round
ระยะทาง = 20		km/round
ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628		km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 312.50 x 20 x 0.832 / (3,000 x 1.628)

= 1.06 kg/ha/yr

รวมปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ขนส่ง = 84.54 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 4.184×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $84.54 \times 4.184 \times 10^{7}$

= 3.54×10^{9} J/ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 1.10×10^{5} sej/J

คิดเป็นเอเมอร์จี = 3.89×10^{14} *sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

(ข้อมูลจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกสบู่ดำ)

11. *ค่าแรง*

รายการ บาท		/ไร่ ครั้ง	/ปี คิดเป็น	
ค่าจ้างใส่ปุ๋ย (2คน/ไร่)	440	2	178.75	$/ha/yr
ค่าตัดแต่งทางใบ (2คน/ไร่)	220	1	44.68	$/ha/yr
ค่ากำจัดวัชพืช (2คน/ไร่)	220	1	44.68	$/ha/yr
ค่าเก็บเกี่ยวทะลาย (2คน/ไร่)	440	20	1787.45	$/ha/yr

รวม ค่าแรงและการจัดการ = 2055.56 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 3.70×10^{12} sej/$

คิดเป็นเอเมอร์จี = 7.61×10^{15} *sej/ha/yr*

12. *ค่าจ้างอื่นๆ* = 720 baht/rai/yr = 146.25 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 3.70×10^{12} sej/$

คิดเป็นเอเมอร์จี = 5.41×10^{14} *sej/ha/yr*

13. *ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์* = 120 baht/rai/yr = 24.23 $/ ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 3.70×10^{12} sej/$

คิดเป็นเอเมอร์จี = 9.02×10^{13} *sej/ha/yr*

การหีบน้ำมัน

14. *ไฟฟ้า*

ไฟฟ้าที่ใช้ในการแตกเมล็ด (Cracking)

100-200 กิโลกรัมของเมล็ดต่อชม.ใช้ไฟฟ้า 2 hp (0.031 kg/s)

1 hp เป็น 746 J/s

ปริมาณเมล็ดสบู่ดำที่ได้	=	8750	kg/ha/yr
ปริมาณไฟฟ้า =		2 x 746 x 3600 / average(100,120)	
	=	48,829.09	J/kg seeds
	=	48,829.09 x 8750	
=		4.27×10^{8}	J/ha/yr

ไฟฟ้าที่ใช้ในการบดและหีบน้ำมัน (Screw pressing)

12.2-2 ลิตรน้ำมันสบู่ดำต่อชม. (L JO/hr) ใช้ไฟฟ้า 5 hp (0.0045 L/s)

ปริมาณไฟฟ้า =		5 x 746 x 3600 / average(12.2,2)	
	=	8.34×10^{5}	J/L JO
	=	8.34×10^{5} x 8750	
=		1.91×10^{9}	J/ha/yr

ไฟฟ้าที่ใช้ในการกรองน้ำมัน (Filtrating)

150-170 ลิตรน้ำมันสบู่ดำต่อชม. (L JO/hr) ใช้ไฟฟ้า 2 hp (0.044 L/s)

ปริมาณไฟฟ้า =		2 x 746 x 3600 / average(150,170)	
	=	8.34×10^{5}	J/L JCO
	=	8.34×10^{5} x 8750	
=		7.68×10^{7}	J/ha/yr
รวมปริมาณไฟฟ้าที่ใช้	=	$\underline{2.41 \times 10^{9}}$	*J/ha/yr*
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.36×10^{5}	sej/J
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{8.10 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

17. *ค่าแรง*

ค่าแรง =		0.134 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*4.96×10^{11}*	*sej/ha/yr*

18. *เครื่องมือ*

น้ำหนักเครื่องหีบน้ำมัน (สมมุติให้เป็นเหล็กทั้งหมด)	=	0.17	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	1.13×10^{13}	sej/kg steel
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*1.92×10^{12}*	*sej/ha/yr*

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

น้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำที่ได้ต่อตันผลสบู่ดำสด =		230	kg/ton FFB
ผลสบู่ดำสดที่ได้จากการปลูก =		8.75	ton FFB/ha/yr
น้ำมันสบู่ดำ =		2012.5	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	3.96×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$2012.5 \times 3.96 \times 10^{7}$	
	=	7.97×10^{10}	J/ha/yr

กากเหลือ (Residues)

เนื้อเมล็ด

เนื้อเมล็ดที่ได้ต่อตันผลปาล์มสด =		750	kg/ton FFB
เนื้อเมล็ด =		6562.5	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.88×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$750 \times 1.88 \times 10^{7}$	
	=	1.23×10^{11}	J/ha/yr

รวมชีวมวลปาล์ม = 8575 kg/ha/yr

= 2.03×10^{11} J/ha/yr

การคิดทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (รวม L&S) = 1.51×10^{16} *sej/ha/yr*

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S) = 6.89×10^{15} *sej/ha/yr*

ทรานส์ฟอร์มิตีของน้ำมันปาล์ม

แบบรวม L&S = (1.51×10^{16} sej/ha/yr) / (7.97×10^{10} J/ha/yr)

= 1.90×10^{5} sej/J

แบบไม่รวม L&S = (6.89×10^{15} sej/ha/yr) / (7.97×10^{10} J/ha/yr)

= 8.65×10^{4} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของน้ำมันปาล์ม

แบบรวม L&S = (1.51×10^{16} sej/ha/yr) / (2012.5 kg/ha/yr)

= 7.52×10^{12} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = (6.89×10^{15} sej/ha/yr) / (2012.5 kg/ha/yr)

= 3.42×10^{12} sej/kg

ทรานส์ฟอร์มิตีของชีวมวลปาล์ม

แบบรวม L&S = (1.51×10^{16} sej/ha/yr) / (2.03×10^{11} J/ha/yr)

= 7.45×10^{4} sej/J

แบบไม่รวม L&S = (6.89×10^{15} sej/ha/yr) / (2.03×10^{11} J/ha/yr)

= 3.39×10^{4} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของชีวมวลปาล์ม

แบบรวม L&S = (1.51×10^{16} sej/ha/yr) / (8,575 kg/ha/yr)

= 1.76×10^{12} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = (6.89×10^{15} sej/ha/yr) / (8,575 kg/ha/yr)

= 8.04×10^{11} sej/kg

วิธีการคำนวณสำหรับตารางที่ 4.16 และ 4.17

ขั้นการผลิตไบโอดีเซล (ข้อมูลจากกรมอู่ทหารเรือ)

1. *เมทานอล*

ปริมาณเมทานอล	=	416.48	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	7.23×10^{9}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{3.01 \times 10^{15}}$	*sej/ha/yr*

2. *โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)*

ปริมาณ NaOH	=	18.30	kg/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{9}	sej/g
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{1.17 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

3. *เรซิน*

ปริมาณเรซิน	=	71.38	$/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{2.64 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

4. *ไฟฟ้า*

ปริมาณไฟฟ้า	=	4.12×10^{8}	J/ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.36×10^{5}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	$\underline{1.38 \times 10^{14}}$	*sej/ha/yr*

5. *น้ำมันดีเซล*

ขนส่ง น้ำมันปาล์ม จากโรงงานหีบน้ำมันไปยังโรงงานกลั่นน้ำมันดิบ

น้ำมันปาล์มที่ได้จากการปลูก =	2,012.50	kg/ha/yr
ความจุรถบรรทุก =	20,000	kg/round
ระยะทาง =	1,628	km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 2012.50 x 1,628 x 0.832 / (20,000 x 1.628)

= 83.72 kg/ha/yr

ขนส่งสารเคมีที่ใช้ในขั้นการ ผลิตไบโอดีเซล จากบริษัทไปยังโรงงานผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณ สารเคมี = 506.16 kg/ha/yr

ความจุรถบรรทุก = 3,000 kg/round

ระยะทาง = 65 km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 506.16 x 65 x 0.832 / (3,000 x 1.628)

= 5.60 kg/ha/yr

ขนส่งไบโอดีเซล จากโรงงานผลิตไบโอดีเซลไปยังแหล่งขาย

น้ำมันปาล์มที่ได้จากการปลูก = 1911.88 kg/ha/yr

ความจุรถบรรทุก = 20,000 kg/round

ระยะทาง = 46 km/round

ระยะทางต่อน้ำมันที่ใช้ = 1.628 km/L

ความหนาแน่นน้ำมันดีเซล = 0.832 kg/L

ปริมาณน้ำมันที่ต้องการ = 1911.88 x 46 x 0.832 / (20,000 x 1.628)

= 2.25 kg/ha/yr

รวมปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ขนส่ง = 91.57 kg/ha/yr

พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy) = 4.184×10^{7} J/kg

คิดเป็นพลังงาน = $91.57 \times 4.184 \times 10^{7}$

= 3.83×10^{9} J/ha/yr

ทรานส์ฟอร์มิตี = 1.10×10^{5} sej/J

คิดเป็นเอเมอร์จี = 4.21×10^{14} *sej/ha/yr*

แรงงานและค่าใช้จ่าย

6. *ค่าแรง*

ค่าแรง =		91.05 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*3.37×10^{14}*	*sej/ha/yr*

7. *ค่าบำรุงรักษา*

ค่าบำรุงรักษา =		100.76 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*3.73×10^{14}*	*sej/ha/yr*

8. *ค่าเสื่อมราคา*

ค่าเสื่อมราคา =		12.04 $/	ha/yr
ทรานส์ฟอร์มิตี	=	3.70×10^{12}	sej/$
คิดเป็นเอเมอร์จี	=	*4.46×10^{13}*	*sej/ha/yr*

ผลิตภัณฑ์ที่ได้

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้ =		1911.88	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	3.81×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$2436.19 \times 3.81 \times 10^{7}$	
	=	7.28×10^{10}	J/ha/yr

กลีเซอรอล

กลีเซอรอลที่ได้ =		412.56	kg/ha/yr
พลังงานกิบส์ (Gibbs free energy)	=	1.9×10^{7}	J/kg
คิดเป็นพลังงาน =		$438.51 \times 1.9 \times 10^{7}$	
	=	7.84×10^{9}	J/ha/yr

รวมเชื้อเพลิงที่ได้ = 2324.44 kg/ha/yr

= 8.06×10^{10} J/ha/yr

การคิดทรานส์ฟอร์มิตีของผลิตภัณฑ์

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (รวม L&S) = 1.98×10^{16} *sej/ha/yr*

เอเมอร์จีทั้งหมดในขั้นการปลูก (ไม่รวม L&S) = 1.08×10^{16} *sej/ha/yr*

ทรานส์ฟอร์มิตีของไบโอดีเซล

แบบรวม L&S = $(1.98 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(7.28 \times 10^{10}$ J/ha/yr)

= 2.73×10^{5} sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(1.08 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(7.28 \times 10^{10}$ J/ha/yr)

= 1.49×10^{5} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของไบโอดีเซล

แบบรวม L&S = $(1.98 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (1911.88 kg/ha/yr)

= 1.04×10^{13} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(1.08 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (1911.88 kg/ha/yr)

= 5.67×10^{12} sej/kg

ทรานส์ฟอร์มิตีของเชื้อเพลิง

แบบรวม L&S = $(1.98 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(8.06 \times 10^{10}$ J/ha/yr)

= 2.46×10^{5} sej/J

แบบไม่รวม L&S = $(1.08 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / $(8.06 \times 10^{10}$ J/ha/yr)

= 1.35×10^{5} sej/J

ทรานส์ฟอร์มิตีจำเพาะของเชื้อเพลิง

แบบรวม L&S = $(1.98 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (2324.44 kg/ha/yr)

= 8.53×10^{12} sej/kg

แบบไม่รวม L&S = $(1.08 \times 10^{16}$ sej/ha/yr) / (2324.44 kg/ha/yr)

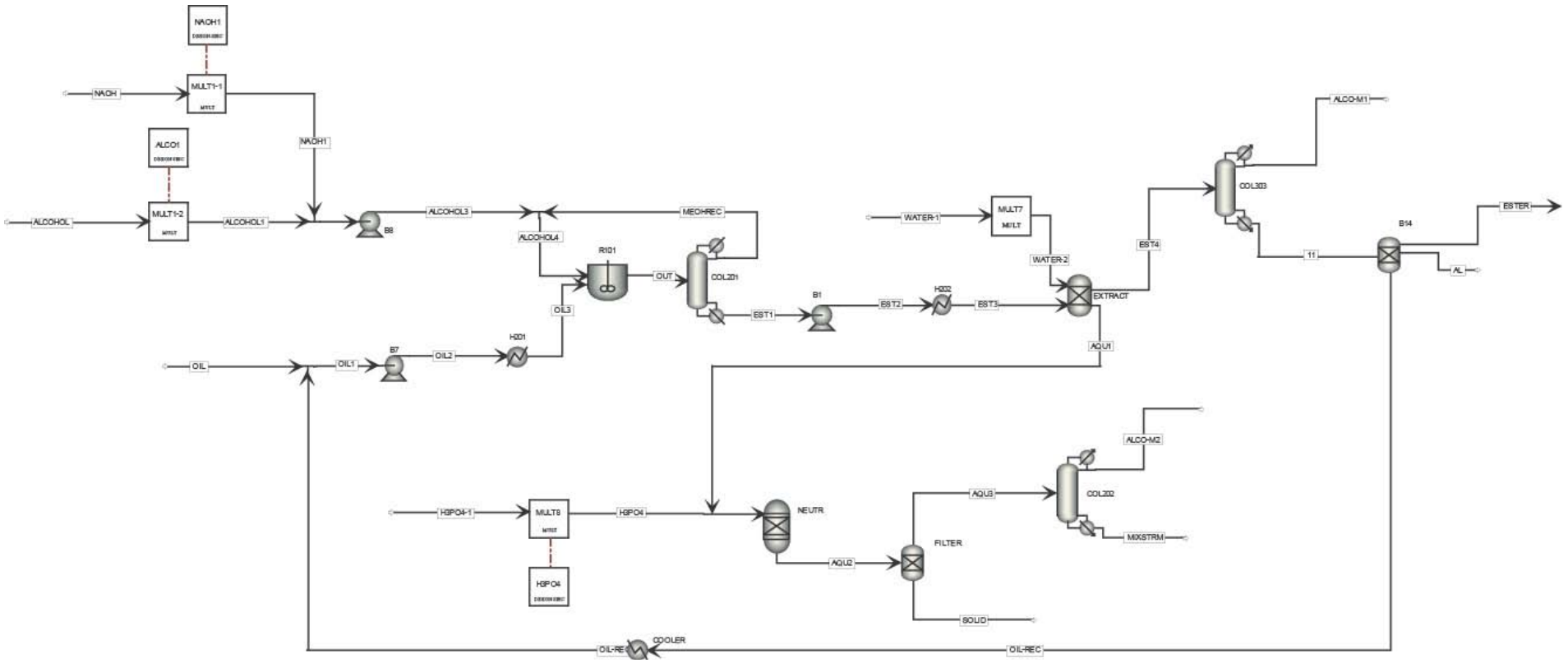
= 4.67×10^{12} sej/kg

ภาคผนวก ข

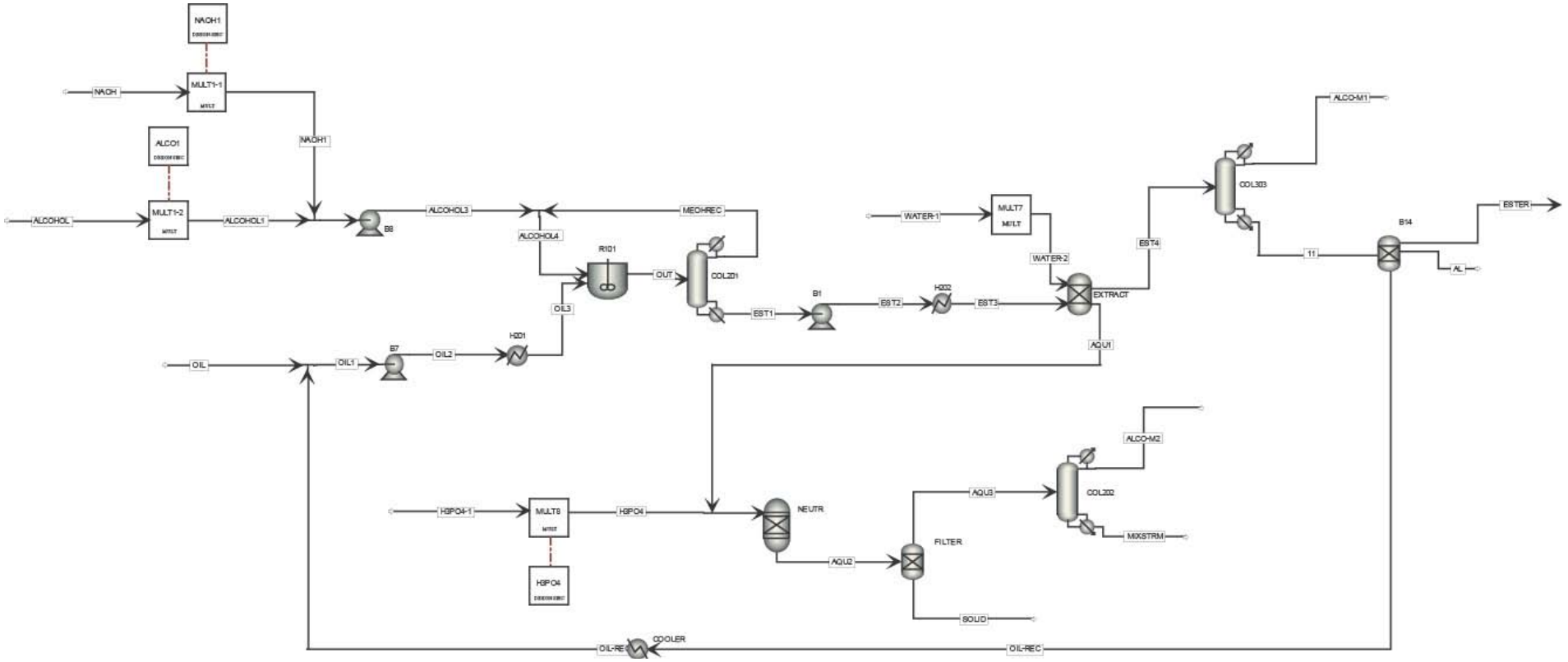
แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

แบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลกรณีศึกษาที่ 4

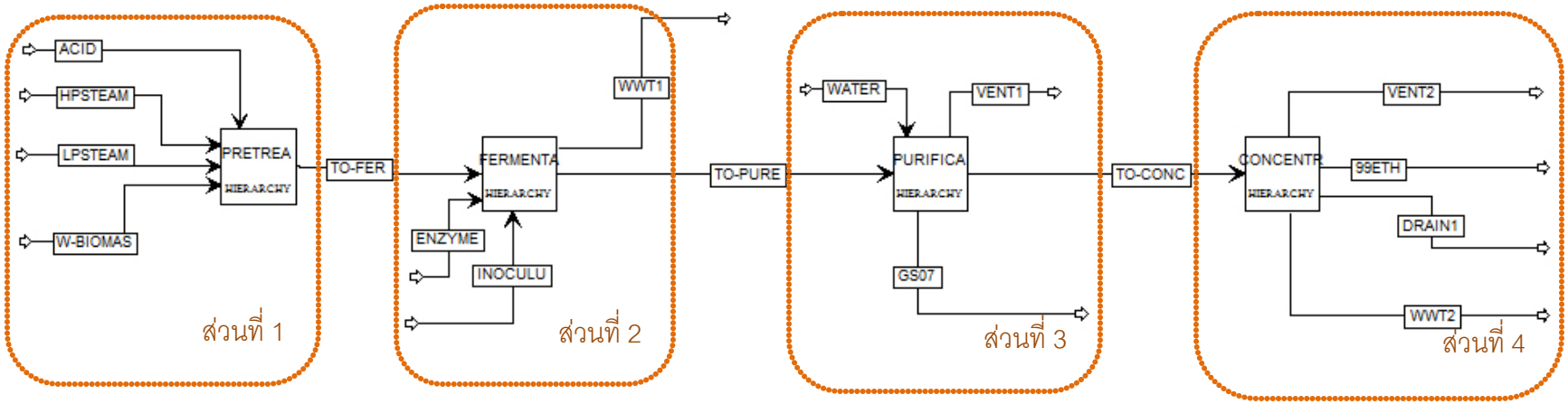
ภาพที่ ข.1 แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลกรณีศึกษาที่ 4



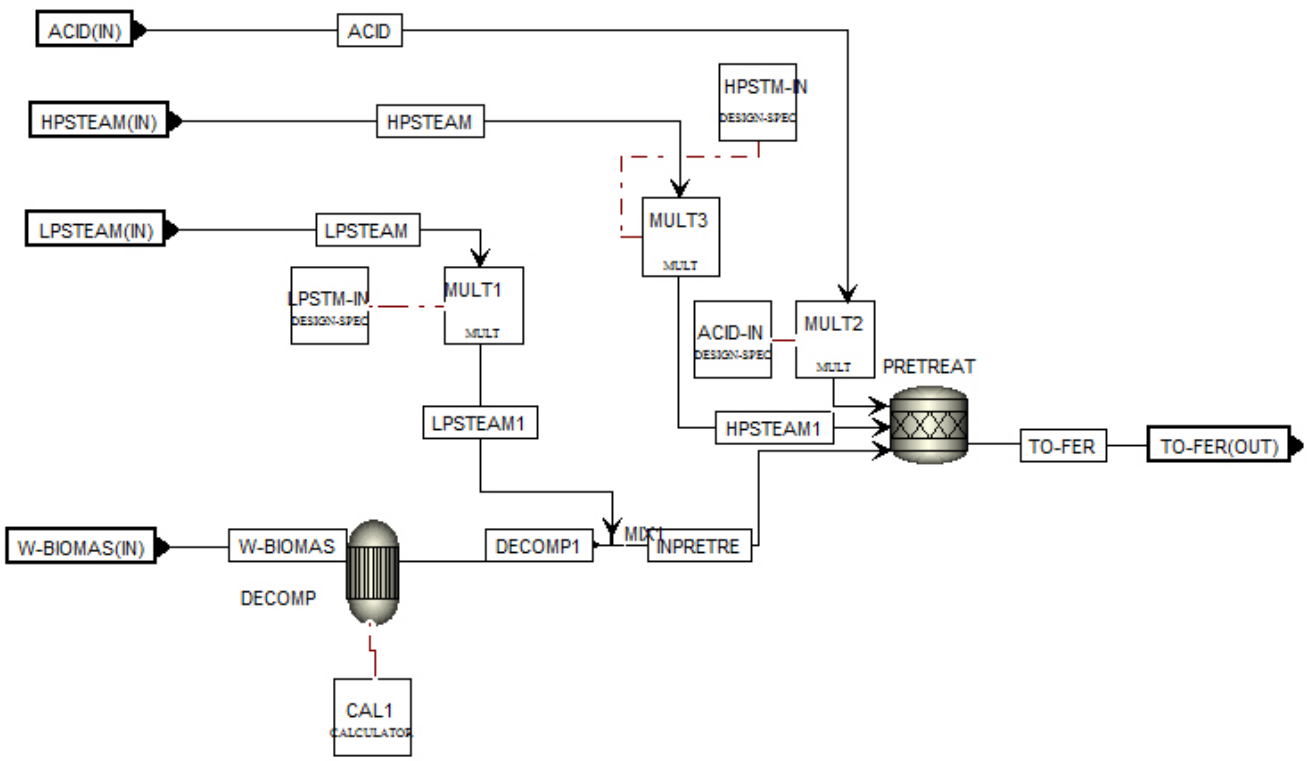
ภาพที่ ข.2 แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภาวะเหนือวิกฤตในกรณีศึกษาที่ 5



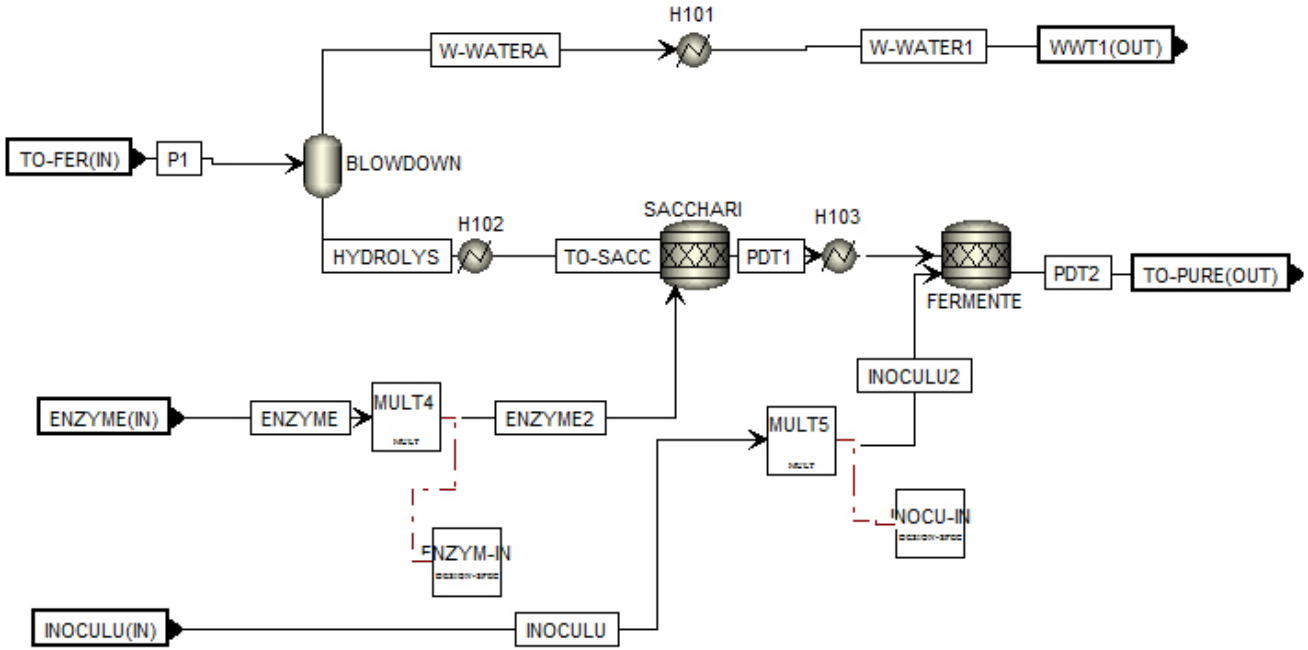
ภาพที่ ข.3 แผนผังภาพรวมแบบจำลองกระบวนการผลิตเอทานอลในกรณีศึกษาที่ 5



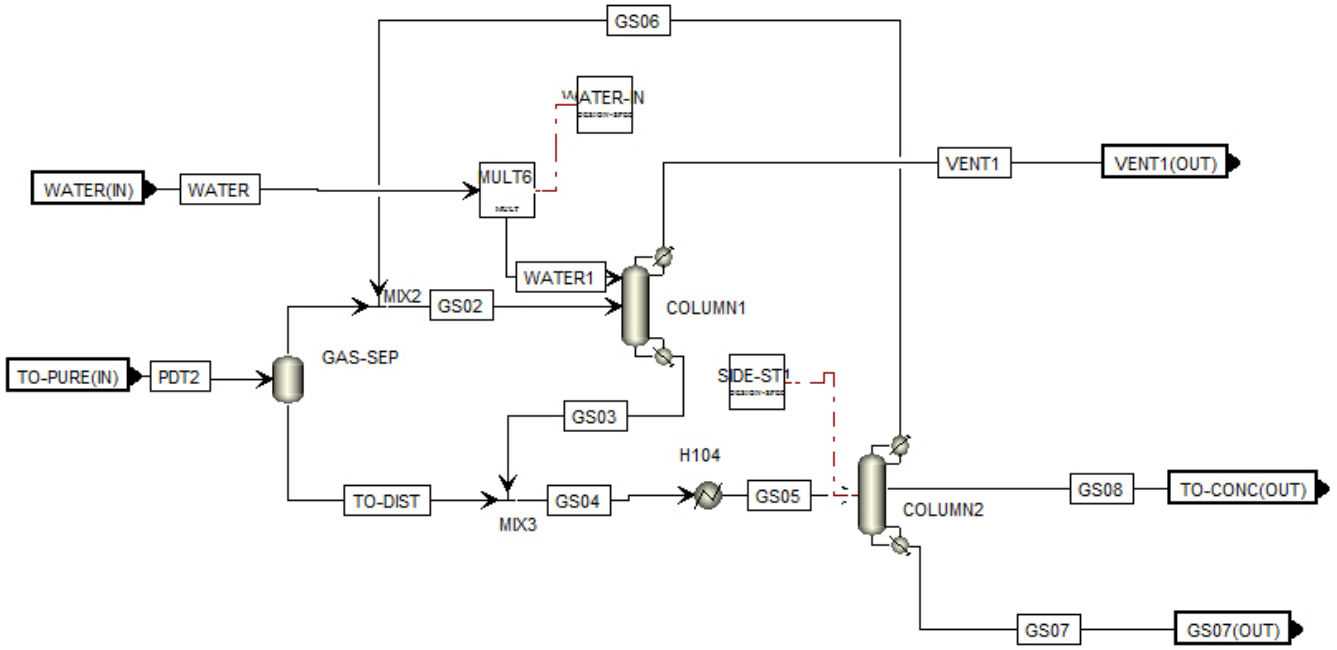
ภาพที่ ข.4 แผนผังส่วนที่ 1 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเอทานอลในกรณีศึกษาที่ 5



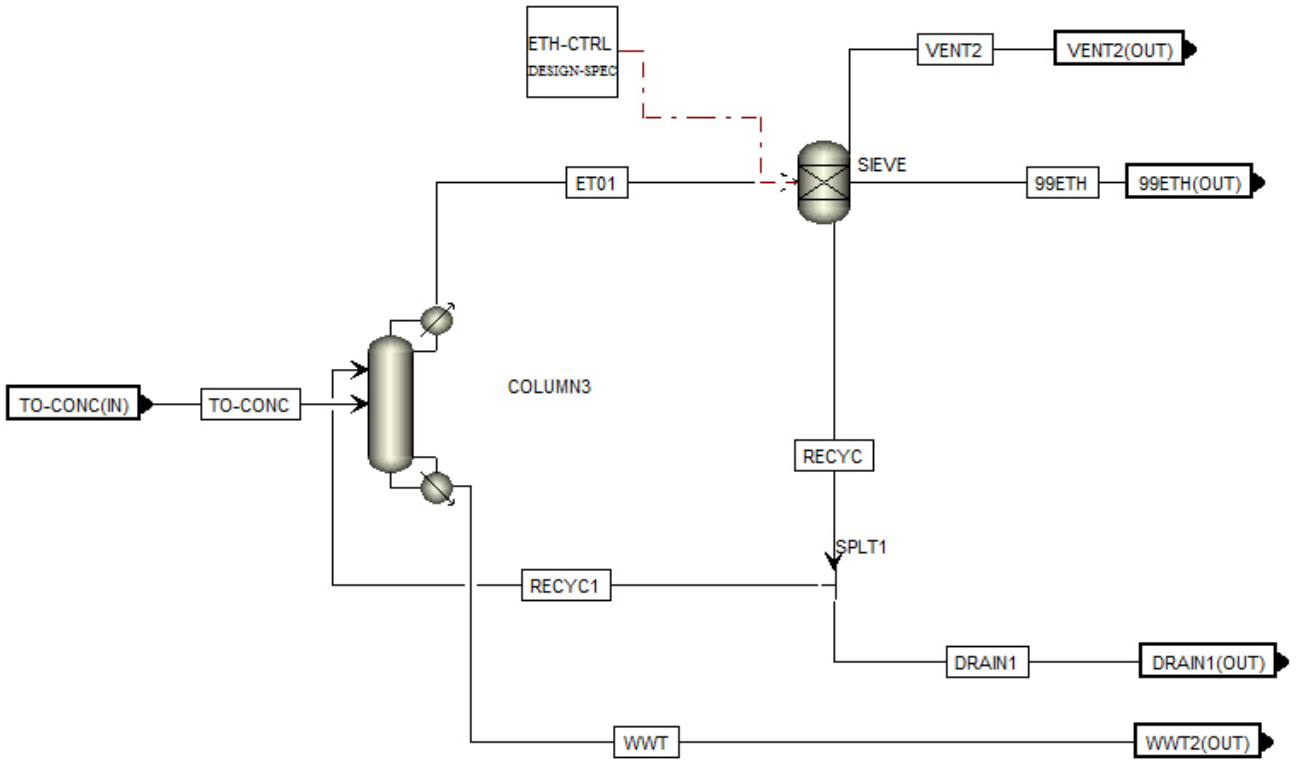
ภาพที่ ข.5 แผนผังส่วนที่ 2 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเอทานอลในกรณีศึกษาที่ 5



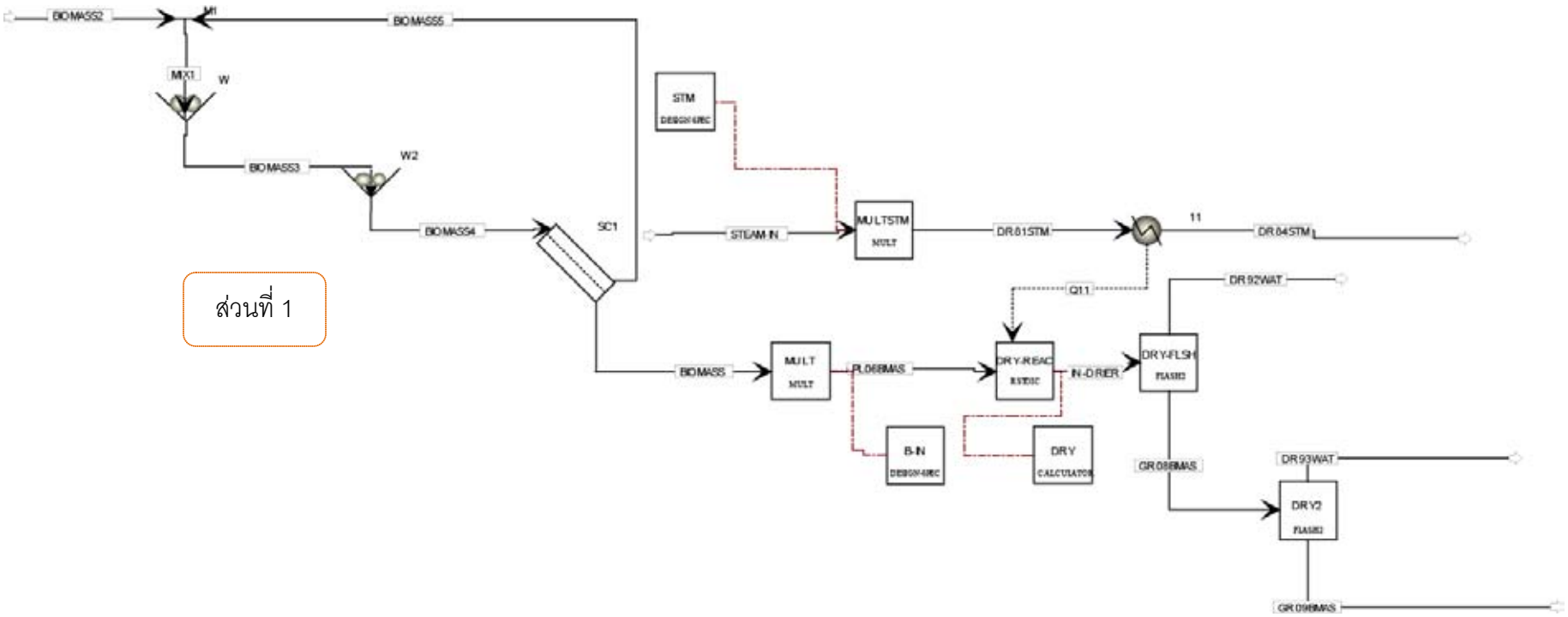
ภาพที่ ข.6 แผนผังส่วนที่ 3 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเอทานอลในกรณีศึกษาที่ 5



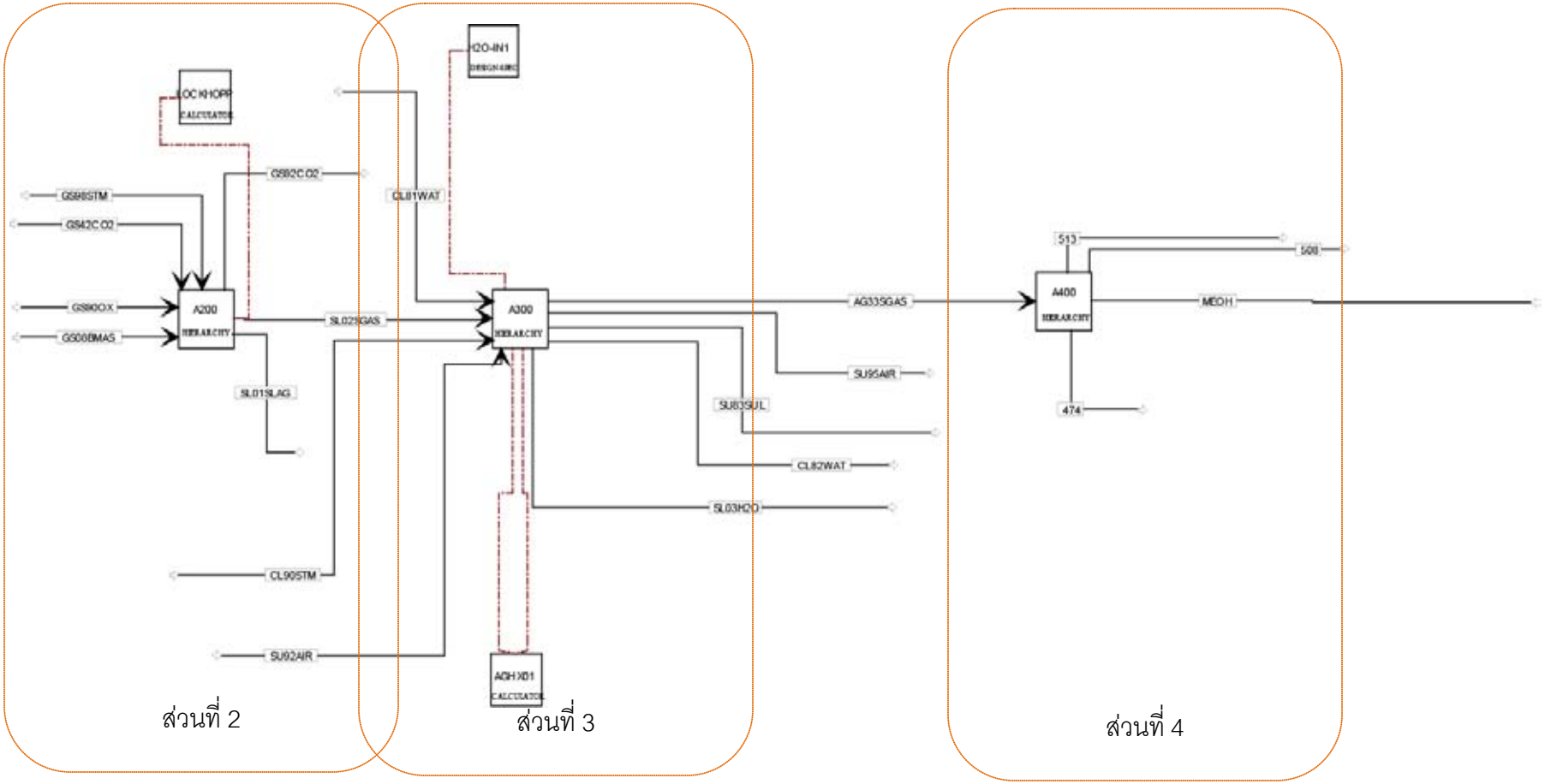
ภาพที่ ข.7 แผนผังส่วนที่ 4 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเอทานอลในกรณีศึกษาที่ 5



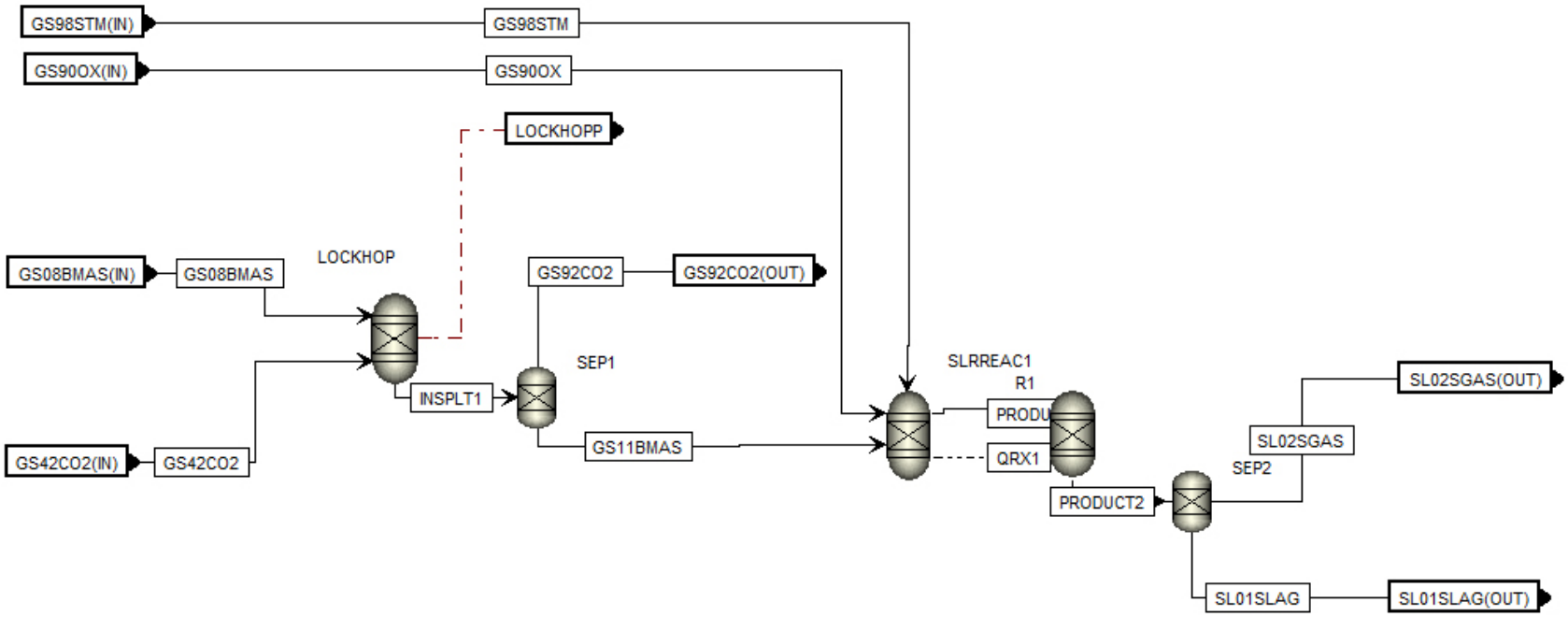
ภาพที่ ข.8 แผนผังส่วนปรับสภาพ (Pretreatment) ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



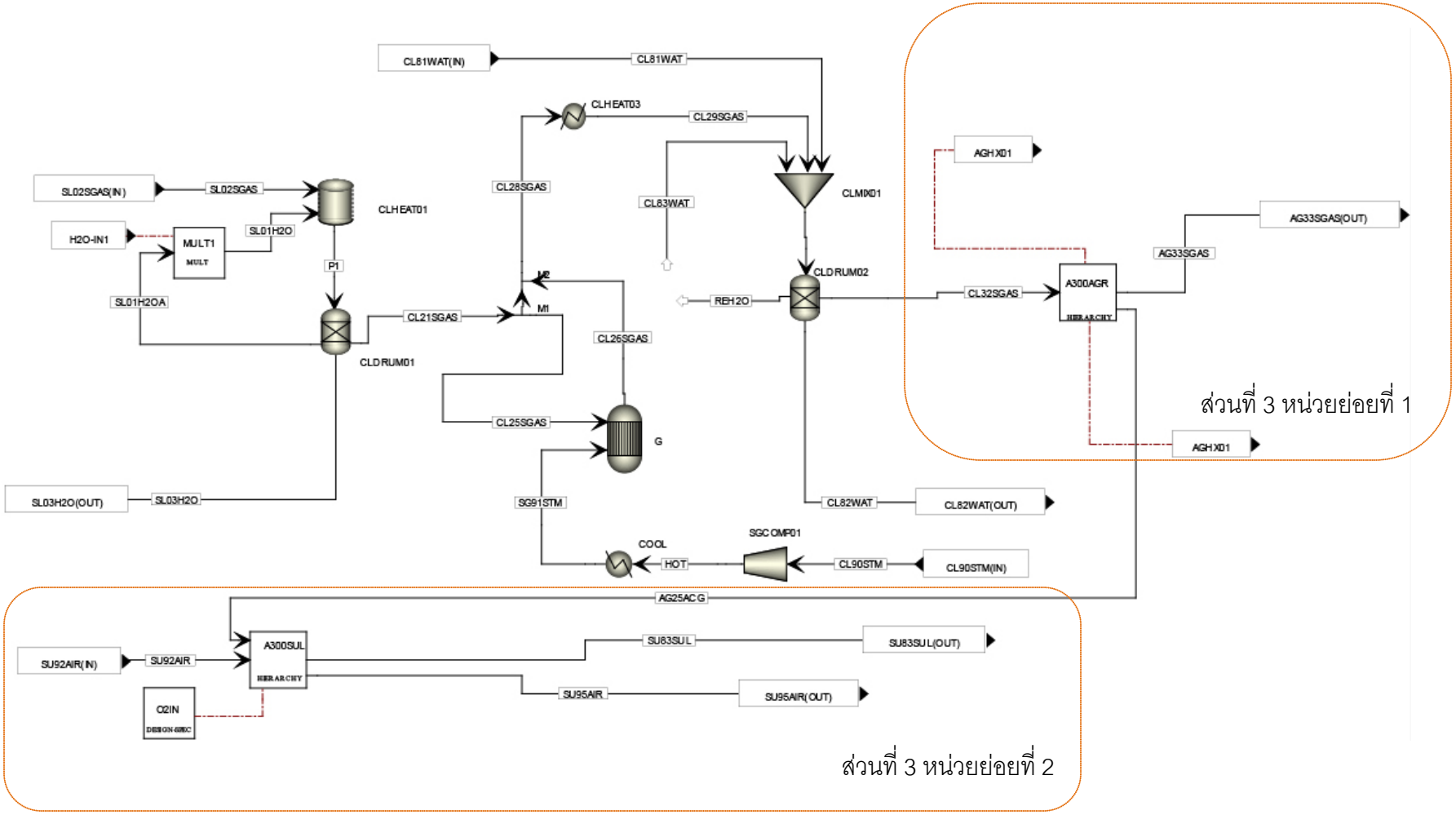
ภาพที่ ข.9 แผนผังภาพรวมหลังส่วนปรับสภาพของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



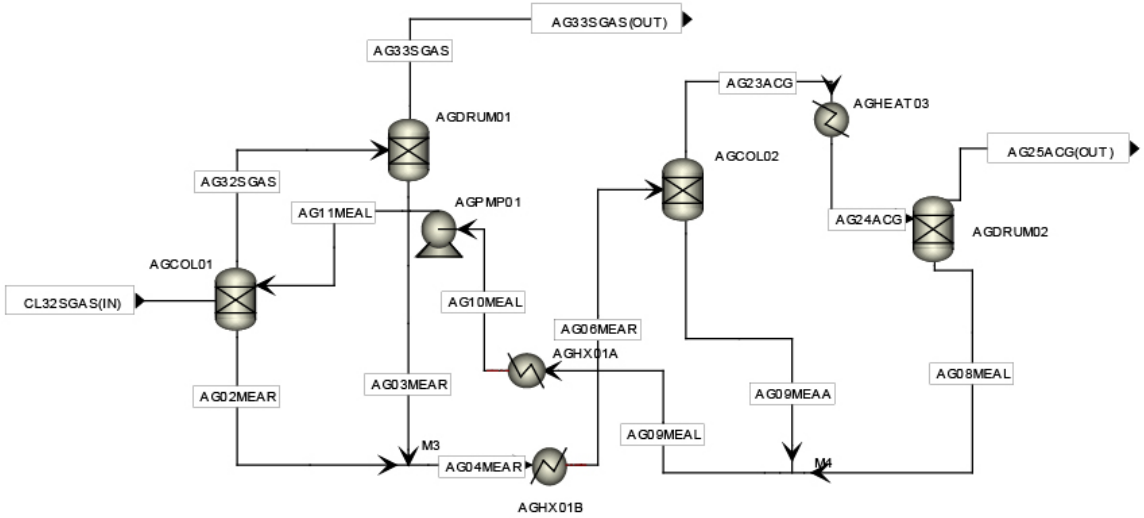
ภาพที่ ข.10 แผนผังส่วนที่ 2 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



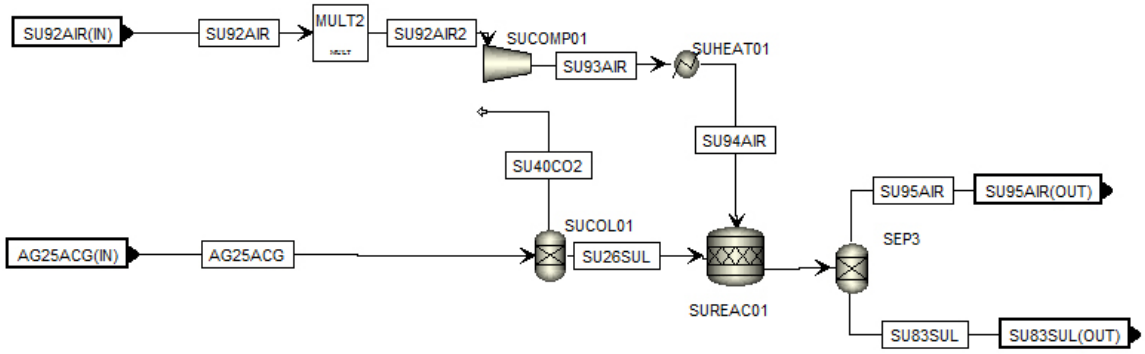
ภาพที่ ข.11 แผนผังส่วนที่ 3 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



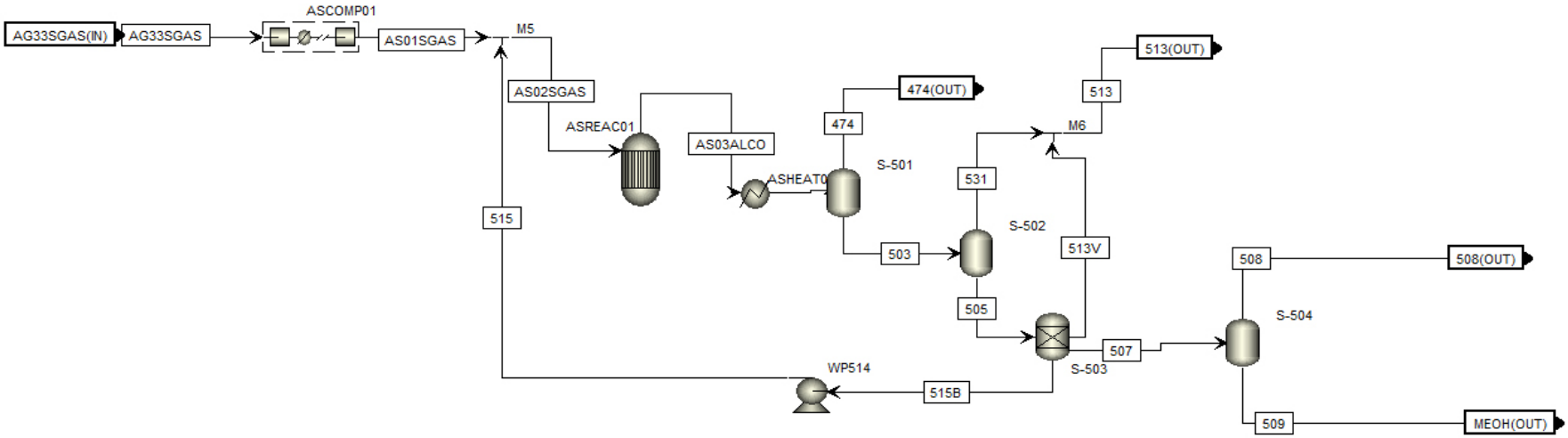
ภาพที่ ข.11 แผนผังส่วนที่ 3 หน่วยย่อยที่ 1 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



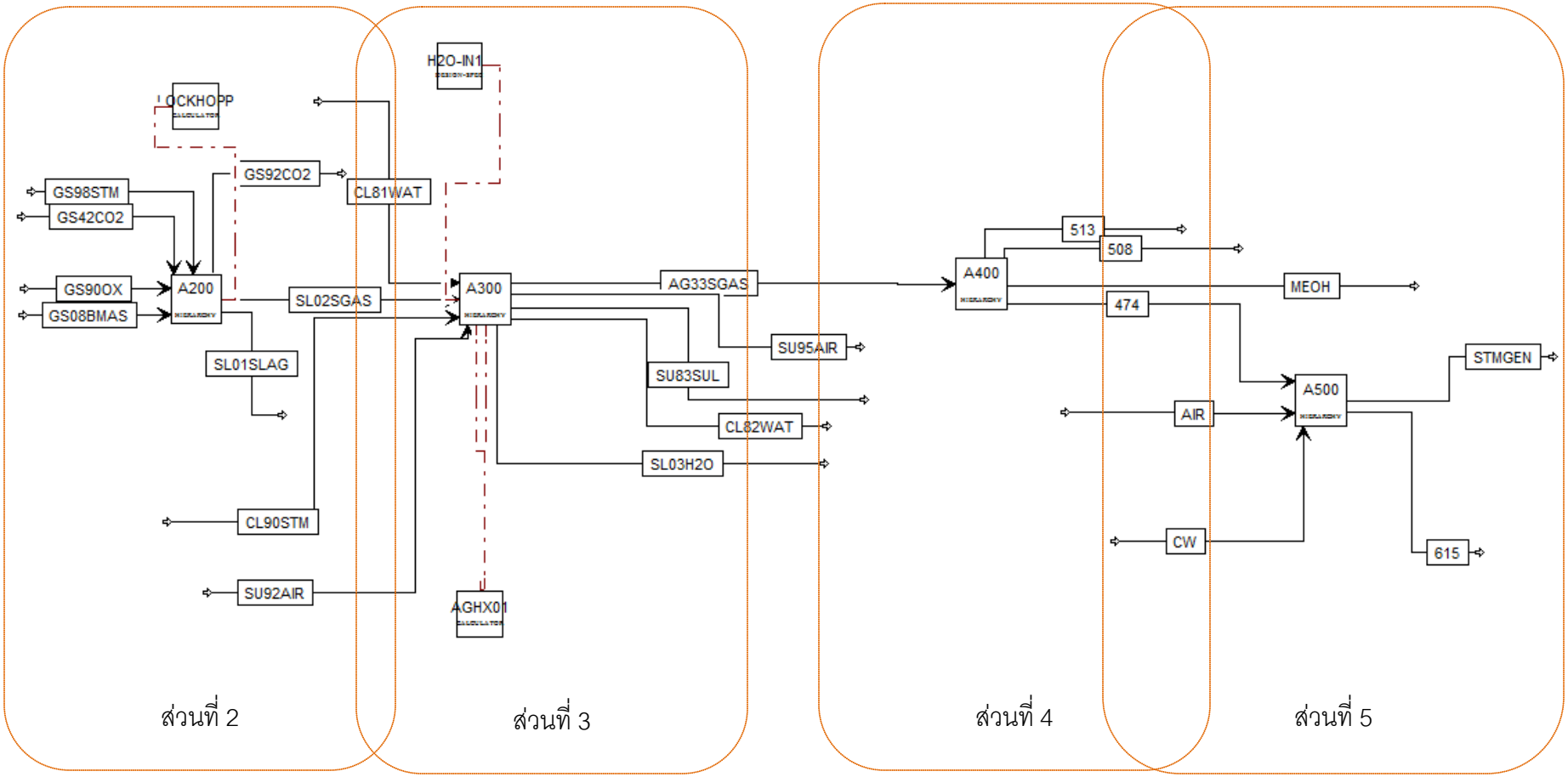
ภาพที่ ข.12 แผนผังส่วนที่ 3 หน่วยย่อยที่ 2 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



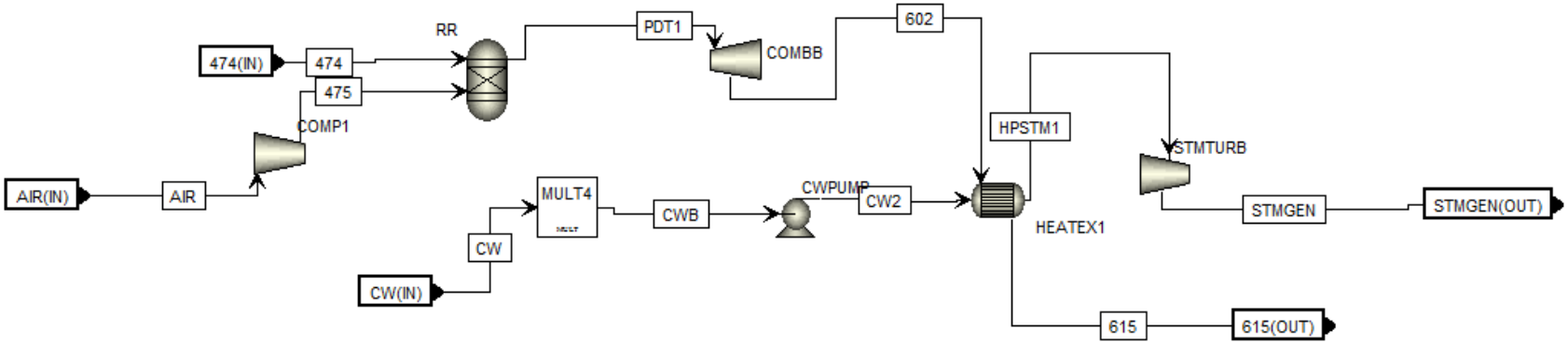
ภาพที่ ข.12 แผนผังส่วนที่ 4 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 6



ภาพที่ ข.13 แผนผังภาพรวมหลังส่วนปรับสภาพของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 7



ภาพที่ ข.14 แผนผังส่วนที่ 5 ของแบบจำลองกระบวนการผลิตเมทานอลในกรณีศึกษาที่ 7



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรารถนา นิมมานเทอดวงศ์ เกิดเมื่อวันพุธที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553