การประเมินวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

นางสาววิรินทร์ กิตติธรรมวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOFUEL FROM TRANSESTERIFICATION PROCESS

Miss Virin Kittithammavong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน
โดย	นางสาววิรินทร์ กิตติธรรมวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ผาริโน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. เอมม่า อาสนจินดา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิรินทร์ กิตติธรรมวงศ์ : การประเมินวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน. (LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOFUEL FROM TRANSESTERIFICATION PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุธา ขาวเธียร, 141 หน้า.

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย รวมถึงในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เป็นวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์นิยมใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ ทำให้มีการใช้ทรัพยากรน้ำปริมาณมาก และก่อให้เกิดน้ำเสีย ต้องนำไปบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้วิธีการกลั่นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการใช้น้ำ และการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในโรงงานได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มสเตียรีนซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (วิธีการกลั่น) และโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (วิธีการล้างด้วยน้ำ) โดยใช้การประเมินตลอดวัฏจักรชีวิตตาม ISO 14040 ประเมินและวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหน่วยของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO2/L B100) ปริมาณการใช้พลังงาน (MJ/L B100) และปริมาณการใช้น้ำ (m3/L B100) มีขอบเขตการศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกปาล์มจนถึงการผลิตไบโอดีเซล (Cradle to Gate) โดยมี 1 ลิตรไบโอดีเซลเป็นหน่วยผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) ในด้านปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ มีค่าเท่ากับ 2.83 kgCO2/L 30.49 MJ/L และ 23.64 m3/L ตามลำดับ การศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ เท่ากับ 1.89 kgCO2/L 18.51 MJ/L และ 10.76 m3/L ตามลำดับ ซึ่งการใช้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่ต่างกัน ส่งผลให้มีกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแตกต่างกัน และทำให้มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำมีความแตกต่างกันไปด้วย การใช้วัตถุดิบยิ่งสะอาด ก็จะยิ่งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์หากใช้เทคโนโลยีแบบเปียกจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และช่วยประหยัดพลังงานภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซล แต่หากใช้เทคโนโลยีแบบแห้งจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรน้ำในกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณาค่าการใช้พลังงานสุทธิตลอดวัฏจักรชีวิต (NEB) โดยมีการคำนึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งมีค่าเท่ากับ 95.72 MJ/L ค่าการใช้พลังงานสุทธิของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีค่า 58.42 MJ/L ค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ (NER) ของการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งเท่ากับ 4.14 และของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกคือ 4.16 จากค่าพลังงานสุทธิและค่าอัตราส่วนทางพลังงาน ซึ่งมีค่าเป็นบวก และมีค่ามากกว่า 1 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า ทั้ง 2 โรงงานได้พลังงานจากผลิตภัณฑ์มากกว่าพลังงานที่ลงทุนไป

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

5570378621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: BIODIESEL / GHG EMISSIONS / LIFE CYCLE ASSESSMENT / TRANSESTERIFICATION

VIRIN KITTITHAMMAVONG: LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOFUEL FROM TRANSESTERIFICATION PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, 141 pp.

Palm oil based biodiesel is a foremost alternative fuel widely distributed in Thailand and South East Asia. Transesterification with alkaline based catalysts is the most common process for converting vegetable oils into biodiesel. Water washing is a typically used method for biodiesel purification after transesterification reaction. Consequently, large volumes of a wastewater stream is generated and discharged into the environment. Biodiesel purification by distillation is one of the available technological options that require less direct water consumption than the conventional water-based purification. In this study, the biodiesel production from palm stearin combined with the dry process (distillation) and with the wet process (water washing) in the purification process were investigated through the environmental life cycle analysis of the product in terms of GHG emissions, energy and water consumption. The boundary of this study was cradle to gate including oil palm cultivation through biodiesel factory and one liter of pure biodiesel was set as the functional unit.

The results of biodiesel production by dry process technology show that the total GHG emissions, the energy and water consumption are 2.83 kgCO2/L, 30.49 MJ/L and 23.64 m3/L, respectively. The results of biodiesel production by wet process technology show that the total GHG emissions, the energy and water consumption are 1.89 kgCO2/L, 18.51 MJ/L and 10.76 m3/L, respectively. Different raw materials for biodiesel production make the different process within factory that affect to the GHG emissions, energy consumption and water consumption. More pure raw material is more reduction of environmental impact. Biodiesel purification by wet process technology will reduce GHG emissions and save the energy in biodiesel production plant. If biodiesel purification is dry process technology, it will reduce water usage a lot. Considering net energy balance and net energy ratio of life cycle biodiesel production by dry process are 95.72 MJ/L and 4.14. Net energy balance (NEB) and net energy ratio (NER) of life cycle biodiesel production by wet process are 58.42 MJ/L and 4.16. From these results can be conclude that both dry and wet process factory can make energy from product more than energy from investment.

Department: Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาในการให้คำปรึกษา ตลอดจนความรู้ และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน อีกทั้งสนับสนุนทุนในการไปประชุมวิชาการ

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ผาริโน อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์ และอาจารย์ ดร. เอมม่า อาสนจินดา ที่ให้เกียรติสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่ให้เกียรติช่วยพาไปเก็บรวบรวมข้อมูลจากโรงงานไบโอดีเซล

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการให้ข้อมูลจากโรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร และโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ขอขอบพระคุณ คุณสัญญา บุญญาสุวัฒน์ ที่ช่วยสละเวลาให้ข้อมูล ให้คำปรึกษา ตลอดจนข้อเสนอแนะอันมีประโยชน์ ขอบคุณ คุณบัณฑิต หรรษาไพบูลย์ คุณจรรยวรรณ บัติบัน คุณสุปัทมา พชรทรัพย์ และพี่ๆ พนักงานทุกท่าน ที่ช่วยสนับสนุน ให้ข้อมูลอย่างเต็มที่

ขอบพระคุณ คุณนวลกมล อาภรณ์พงษ์ และอาจารย์ ดร. อัมพิรา เจริญแสง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตรวจทาน ช่วยหาข้อมูล ที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัย ขอบคุณ คุณพิชิตา เอกเผ่าพันธุ์ และเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ช่วยให้คำปรึกษา รับฟังคำบ่นและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ช่วยสนับสนุนทั้งด้านทุนทรัพย์ ส่งเสริมและกำลังใจในทุกขั้นตอนการดำเนินงาน จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) 4
2.2 ไบโอดีเซล (Biodiesel) 5
2.3 วิธีการลดความหนืดของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ 8
2.4 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน 9
2.5 น้ำมันปาล์ม 13
2.6 มาตรฐานไบโอดีเซล 16
2.7 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) 17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related researches) 22
2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 33
3.1 การดำเนินงานวิจัย 33
3.2 เป้าหมายและขอบเขต 36
3.3 บัญชีข้อมูล 36
3.4 ประเมินผล 42
3.5 แปลผล 42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล 43
4.1 บัญชีข้อมูล 43
4.1.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process) 43
4.1.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process) 53
4.1.3 การผลิตน้ำมันปาล์ม 58
4.1.4 การปลูกปาล์มน้ำมัน 61
4.1.5 การขนส่ง 62
4.1.6 บัญชีข้อมูล (Life Cycle Inventory) 63
4.2 การคำนวณ 68
4.2.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 68
4.2.2 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน 72
4.2.3 การวิเคราะห์การใช้น้ำ 74
4.3 การประเมินผลและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG emissions) 82
4.3.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process) 82
4.3.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process) 84
4.3.3 เปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล 86
4.3.4 เปรียบเทียบกับค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไบโอดีเซลจากองค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก 89
4.3.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ 90
4.4 การประเมินผลและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงาน (Energy consumption) 92
4.4.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process) 92
4.4.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process) 95
4.4.3 เปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล 97
4.4.4 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล 100
4.4.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ 101
4.5 การประเมินผลและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำ (Water consumption) 104
4.5.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process) 104
4.5.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process) 107

หน้า

4.5.3 เปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล 109
4.5.4 เปรียบเทียบกับค่าการใช้น้ำโดยเฉลี่ยของไบโอดีเซล 111
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 113
5.1 สรุปผลการวิจัย 113
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 117
5.3 ข้อเสนอแนะ 118
รายการอ้างอิง 119
ภาคผนวก 123
ภาคผนวก ก คุณสมบัติสารที่ใช้ในการคำนวณ 124
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ 126
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 141

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติในการปลูกพืชเป็นวัตถุดิบสำหรับไบโอดีเซล 5

ตารางที่ 2-2 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีต่างๆ ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี ทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน 9

ตารางที่ 2-3 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 12

ตารางที่ 2-4 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบ 14

ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติน้ำมันปาล์ม 15

ตารางที่ 2-6 ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์ม 15

ตารางที่ 2-7 มาตรฐานไบโอดีเซลในประเทศไทย 16

ตารางที่ 2-8 ลักษณะเครื่องมือวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม 17

ตารางที่ 2-9 รูปแบบการนำการประเมินวัฏจักรชีวิตไปใช้งาน 18

ตารางที่ 2-10 ข้อดีและข้อจำกัดของการประเมินวัฏจักรชีวิต 22

ตารางที่ 2-11 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล 5 กรณี 22

ตารางที่ 2-12 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่จะศึกษาวิจัย 24

ตารางที่ 2-13 บัญชีข้อมูลของการผลิตไบโอดีเซล 1 ตัน 25

ตารางที่ 2-14 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตไบโอดีเซล 1 ล้านลิตรต่อวัน 28

ตารางที่ 2-15 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร 37

ตารางที่ 3-2 บัญชีข้อมูลโรงงานวีระสุวรรณ 40

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 41

ตารางที่ 4-1 ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) 48

ตารางที่ 4-2 ปริมาณสารเข้าและสารออกในแต่ละกระบวนการผลิต 49

ตารางที่ 4-3 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ตารางที่ 4-4 ปริมาณการใช้น้ำมันเตา 51
ตารางที่ 4-5 ปริมาณการใช้น้ำ 52
ตารางที่ 4-6 ปริมาณการใช้โซเดียมคลอไรด์ในการรีเจนเนอร์เรชันถังแลกเปลี่ยนไอออน 52
ตารางที่ 4-7 ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบ 52
ตารางที่ 4-8 ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในการผลิตไบโอดีเซล 56
ตารางที่ 4-9 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าและน้ำมันเตาในกระบวนการผลิต 56
ตารางที่ 4-10 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าสำหรับสถานีสูบและจ่ายน้ำ 57
ตารางที่ 4-11 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตและการใช้ไฟฟ้าสำหรับสถานีสูบจ่ายน้ำ 57
ตารางที่ 4-12 ปริมาณน้ำเสียและปริมาณไฟฟ้าสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย 57
ตารางที่ 4-13 ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบ 58
ตารางที่ 4-14 ข้อมูลปริมาณมวลสารเข้าและสารออกของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม 59
ตารางที่ 4-15 ข้อมูลสารเข้าและสารออกของขั้นตอนการปลูกปาล์มน้ำมัน 62
ตารางที่ 4-16 บัญชีข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งของโรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร 64
ตารางที่ 4-17 บัญชีข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกของโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 66
ตารางที่ 4-18 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor) 69
ตารางที่ 4-19 ค่าการใช้พลังงาน (Energy factor) 72
ตารางที่ 4-20 ค่าความร้อนของสารขาออก (Energy content) 74
ตารางที่ 4-21 ค่าการใช้น้ำ (Water factor) 75
ตารางที่ 4-22 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) 76
ตารางที่ 4-23 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) 79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ตารางที่ 4-24 ข้อแตกต่างระหว่างโรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีเทคโนโลยีการผลิตที่ต่างกัน.....87

ตารางที่ 4-25 ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง.....106

ตารางที่ 4-26 ปริมาณการใช้น้ำของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง.....106

ตารางที่ 4-27 ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก.....108

ตารางที่ 4-28 ปริมาณการใช้น้ำของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก.....108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 แนวโน้มการใช้พลังงาน 4
ภาพที่ 2-2 วัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตไบโอดีเซลในแต่ละประเทศ 6
ภาพที่ 2-3 ปริมาณการผลิตไบโอดีเซล (B100) ในประเทศไทย 7
ภาพที่ 2-4 เทคโนโลยีต่างๆ ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน 9
ภาพที่ 2-5 กลไกการเกิดไบโอดีเซลด้วย Homogeneous catalyst 12
ภาพที่ 2-6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี Homogeneous base catalytic transesterification 12
ภาพที่ 2-7 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีใช้น้ำล้าง (Water Washing) 13
ภาพที่ 2-8 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการกลั่น (Distillation) 13
ภาพที่ 2-9 ส่วนประกอบของปาล์มน้ำมัน 14
ภาพที่ 2-10 กรอบการดำเนินงานประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ ISO14040 20
ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 35
ภาพที่ 3-2 แผนผังกระบวนการผลิตโรงงานวีระสุวรรณ 38
ภาพที่ 3-3 แผนผังข้อมูลสำหรับการเก็บข้อมูลโรงงานวีระสุวรรณ 39
ภาพที่ 4-1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process) 47
ภาพที่ 4-2 มวลสารเข้าและสารออกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) 48
ภาพที่ 4-3 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process) 55
ภาพที่ 4-4 มวลสารเข้าและสารออกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process) 55
ภาพที่ 4-5 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง 83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ภาพที่ 4-6 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซล ด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง 84

ภาพที่ 4-7 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซล ด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก 85

ภาพที่ 4-8 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซล ด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก 86

ภาพที่ 4-9 ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วย เทคโนโลยีแบบแห้ง 94

ภาพที่ 4-10 ปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยี แบบแห้ง 94

ภาพที่ 4-11 ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วย เทคโนโลยีแบบเปียก 96

ภาพที่ 4-12 ปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยี แบบเปียก 96

ภาพที่ 4-13 ปริมาณการใช้น้ำในโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งในแต่ละ กระบวนการผลิต 106

ภาพที่ 4-14 ปริมาณการใช้น้ำในโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกในแต่ละ กระบวนการผลิต 109

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันนี้มีมากมายแต่ที่ส่งผลกระทบในวงกว้างทั่วทุกมุมโลกคือ สถานการณ์โลกร้อน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติที่รุนแรงต่างๆ ตามมา ไม่ว่าจะเป็นน้ำท่วม พายุที่มีความรุนแรง และมีความถี่มากขึ้น เป็นต้น จึงทำให้เกิดการเคลื่อนไหวด้านสิ่งแวดล้อมขึ้นทั้งพิธีสารเกียวโตว่าด้วยการลด เลิกการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการหันกลับมาใช้พลังงานทางเลือก ทำให้เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) เป็นที่น่าสนใจมากขึ้นเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน เชื้อเพลิงชีวภาพที่นิยมใช้ได้แก่ ไบโอดีเซล (Biodiesel) เนื่องจากง่ายต่อการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้แก่ยานพาหนะซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องยนต์ดีเซล โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ก่อนนำไบโอดีเซลมาใช้งาน

ไบโอดีเซล เป็นการใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาเป็นแหล่งเชื้อเพลิง โดยมีข้อดีคือ ไบโอดีเซลมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด แต่มีข้อจำกัดคือน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบนั้นมีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอื่นในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านอาหาร เครื่องสำอาง เป็นต้น ทำให้ปริมาณวัตถุดิบอาจไม่เพียงพอต่อการผลิตไบโอดีเซลเพื่อรองรับความต้องการของทั้งประเทศ อีกทั้งน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์นั้นมีความหนืดสูง ถ้าใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงจะทำให้เกิดปัญหาด้านการหล่อลื่น เกิดการสะสมของคาร์บอน และระบบอัดฉีดเกิดการอุดตัน ดังนั้นการลดความหนืดของน้ำมันพืชสามารถทำได้ 4 วิธีดังนี้

1) การผสมน้ำมันพืชกับดีเซลโดยตรง (Direct Blending) ทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลงแต่ความหนืดที่ได้ก็ยังคงมีมากเกินไป จึงเหมาะกับพวกเครื่องยนต์สำหรับการเกษตร
2) ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) ทำให้ความหนืดต่ำลง ค่าซีเทน (Cetane number) เพิ่มมากขึ้น เผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น ไม่มีของเสียจากกระบวนการ และลดปริมาณฝุ่น ควันที่ถูกปล่อยออกมา แต่มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดคาร์บอนสะสมในเครื่องยนต์มาก อาจเกิดการอุดตันที่หัวฉีดเครื่องยนต์ได้
3) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้ความหนืดต่ำลง ค่าซีเทนเพิ่มขึ้น มีความหลากหลายของปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ดังนั้นวิธีนี้จึงยากที่จะควบคุมผลผลิตให้ได้ตามที่ต้องการ ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและเครื่องมือที่เฉพาะ อีกทั้งใช้พลังงานสูงในการแยกไบโอดีเซลออกมา เพราะฉะนั้นจึงมีการลงทุนสูง
4) ทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยเฉพาะการใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากต้นทุนที่ใช้ไม่สูงมาก ควบคุมการผลิตได้ง่าย ได้ผลผลิตเป็นอัลคิลเอสเตอร์ (ไบโอดีเซล หรือ B100) กับกลีเซอรอล ซึ่งสามารถแยกเอสเตอร์ออกมาได้ง่าย แต่ต้องมีความระมัดระวังไม่ให้เกิดสบู่ในระหว่างทำปฏิกิริยามากเกินไป เพราะสบู่จะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความหนืดสูงขึ้นและยากต่อการแยกไบโอดีเซลจากกลีเซอรอลได้ เพื่อลดข้อเสียเหล่านี้จึงทำให้กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันมีแนวทางอื่นๆ ถูกนำเสนอและทำ

เป็นงานวิจัยมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ในสภาวะวิกฤติ เป็นต้น

ในประเทศไทยนิยมใช้วิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปาล์มน้ำมันมีผลผลิตในประเทศสูงถึง 12 ล้านตันต่อปี (พ.ศ. 2555) อีกทั้งรัฐบาลไทยยังมีนโยบายสนับสนุนให้มีการปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศให้มากขึ้น จากการศึกษาการประเมินวัฏจักรไบโอดีเซลตั้งแต่การปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม จนถึงโรงงานผลิตไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบขั้นตอนต่างๆ ในภาพรวม พบว่าไบโอดีเซลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าน้ำมันดีเซลจึงเหมาะที่จะใช้เป็นพลังงานทดแทนในประเทศ ทำให้ลดการนำเข้าปิโตรเลียม เพิ่มความมั่นคงทางพลังงานให้แก่ไทยได้ ซึ่งขั้นตอนการปลูกปาล์มปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเนื่องจากมีการใช้ปุ๋ย รองลงมาเป็นขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยเปรียบเทียบผลกระทบในภาพรวม และเน้นเปรียบเทียบในแต่ละกระบวนการย่อยได้แก่ ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ และการทำแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์ โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ตาม ISO14040 มาช่วยในการประเมินหาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น รวมถึงปริมาณการใช้พลังงาน และการใช้น้ำ ซึ่งจะทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลเฉพาะกระบวนการผลิตได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เพื่อเป็นพื้นฐานแนวคิด การปรับปรุงให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้นต่อไป รวมถึงกระบวนการย่อยด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันนั้นยังไม่มีการศึกษา การวิจัย และเปรียบเทียบในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำในเชิงปริมาณของการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยรวมของการผลิตไบโอดีเซล ตั้งแต่กระบวนการปลูกปาล์มจนถึงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

1.2.3 เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในด้านการปล่อยการเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำในโรงงานผลิตไบโอดีเซลแต่ละกระบวนการย่อย และเปรียบเทียบระหว่างโรงงานผลิตไบโอดีเซลที่มีกระบวนการผลิตที่ต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบัน โดยทำการเก็บข้อมูลจากโรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร และโรงงาน

บางจากไบโอฟูเอล บางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งใช้ปาล์มน้ำมันผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันแบบใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา

1.3.2 ใช้หลักการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ (LCA) เป็นเครื่องมือในการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ

1.3.3 ทำการประเมินผลกระทบตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนสิ้นสุดกระบวนการผลิตภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซล (Business to Business: B2B หรือ Cradle to Gate)

1.3.4 มีหน่วยอ้างอิงหรือหน่วยผลิตภัณฑ์ (Functional Unit) คือ 1 ลิตรของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

1.3.5 ข้อมูลที่ทำการศึกษาและเก็บวิเคราะห์

- ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล ขั้นตอนการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น และการขนส่ง
- อัตราการไหลของสารเข้า สารออก
- ปริมาณของสารเข้า สารออก
- พลังงานที่ใช้
- ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้
- ระยะเวลาการทำงานในแต่ละกระบวนการย่อย
- การขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ เช่น ระยะทาง ประเภทยานพาหนะ ปริมาณที่ต้องขนส่ง

เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย

1.4.1 ได้มาซึ่งข้อมูลที่ชัดเจนในกระบวนการผลิตภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

1.4.2 สามารถมองภาพรวมของผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต และผลกระทบในแต่ละกระบวนการย่อยภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลได้

1.4.3 สามารถบอกถึงขั้นตอนในกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันและปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบ

1.4.4 ใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบเชิงปริมาณของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ต่างกัน

1.4.5 ใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการวางแผน และออกแบบให้การผลิตไบโอดีเซลเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

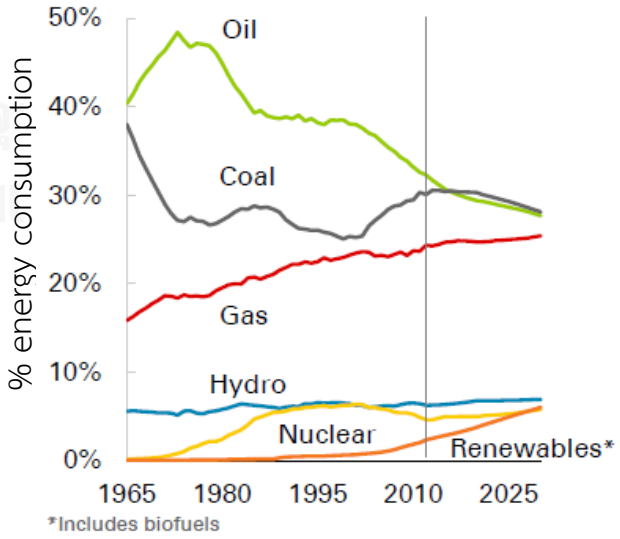
1.4.6 เป็นฐานข้อมูลในการประเมินวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel)

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความเจริญให้แก่มนุษย์ แหล่งพลังงานหลักที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ถูกใช้มากกว่าร้อยละ 80 ของพลังงานที่ใช้ในโลก และมีบทบาทสำคัญมากในโลกปัจจุบันเนื่องจากมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ ได้ถูกนำไปใช้ในแง่ของการคมนาคม การขนส่งต่างๆ (Lora E.S. และคณะ, 2009) ทำให้ประเทศที่มีทรัพยากรเหล่านี้กลายเป็นประเทศมหาอำนาจ ดังนั้นประเทศอื่นที่ไม่มีแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลต้องมีการนำเข้าในราคาที่สูง ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นต่อไปในอนาคต จึงทำให้ขาดความมั่นคงทางพลังงาน อีกทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิลยังเป็นปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน และก่อมลพิษทางอากาศจำนวนมาก เพราะฉะนั้นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) จึงถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกมากขึ้น ดังภาพที่ 2-1 เชื้อเพลิงชีวภาพยกตัวอย่างเช่น ไบโอดีเซล ไบโอเอทานอล เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตมาจากแหล่งวัสดุธรรมชาติ วัสดุทางการเกษตร

แนวความคิดในการนำเชื้อเพลิงชีวภาพมาใช้มีดังนี้คือ 1) สามารถใช้เผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ได้ 2) ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ 3) เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable source) 4) เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้กลับสู่วัฏจักรคาร์บอน ให้พืชนำไปใช้สังเคราะห์แสง 5) ไม่กระทบต่อการผลิตอาหารสำหรับการบริโภค (Lora E.S. และคณะ, 2009)



ภาพที่ 2-1 แนวโน้มการใช้พลังงาน (BP, 2013)

2.2 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลเป็นการใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาเป็นแหล่งเชื้อเพลิง โดยรูดอร์ฟ ดีเซล ได้คิดค้นโมเดลเครื่องยนต์ดีเซลขึ้นในวันที่ 10 สิงหาคม ค.ศ.1893 ต่อมาในปี ค.ศ.1900 รูดอร์ฟ ดีเซล ได้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ดีเซลขึ้น ซึ่งทดลองครั้งแรกกับน้ำมันถั่ว (Peanut oil) ดังนั้นน้ำมันจากพืชหรือสัตว์จึงถูกนำมาใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลและใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลในปัจจุบันได้โดยไม่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์ก่อนนำไบโอดีเซลไปใช้ จึงมีการประกาศให้วันที่ 10 สิงหาคม ของทุกปีเป็นวันไบโอดีเซลสากล (International Biodiesel Day) (Lin L. และคณะ, 2011) การนำไบโอดีเซลไปใช้นั้นจะถูกระบุเป็นอักษรย่อ BXX ซึ่งอักษร B หมายถึง ไบโอดีเซล (Biodiesel) และ XX คือตัวเลขที่บอกถึงร้อยละโดยปริมาตรของไบโอดีเซล ยกตัวอย่างเช่น B100 ก็คือน้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 100 ถ้าเป็น B20 จะหมายถึงน้ำมันประกอบด้วยไบโอดีเซลร้อยละ 20 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 โดยปริมาตร เป็นต้น

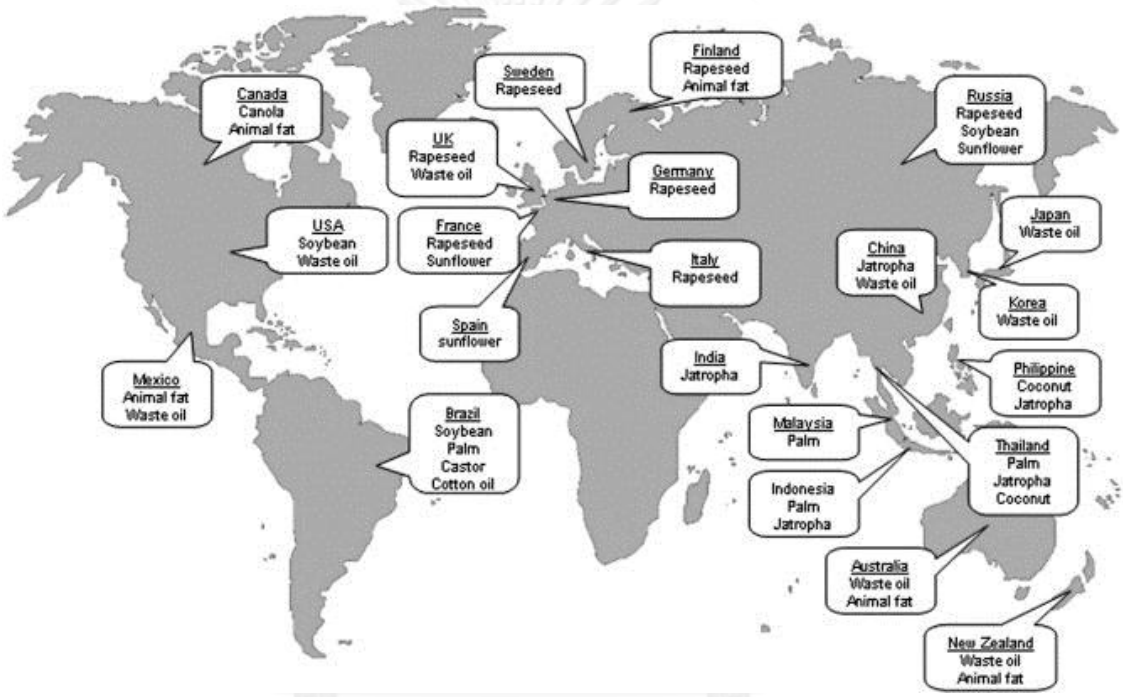
วัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลคือ น้ำมันและไขมัน ซึ่งมาจาก 1) พืชน้ำมัน (Oleaginous plants) เช่น ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา เมล็ดทานตะวัน สบู่ดำ ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น 2) ไขมันสัตว์ 3) น้ำมันพืชใช้แล้วจากการประกอบอาหาร เช่น จากบ้านเรือน โรงแรม ภัตตาคาร เป็นต้น วัตถุดิบแต่ละชนิดนั้นต้องการลักษณะภูมิอากาศที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่างดังตารางที่ 2-1 และเนื่องจากในแต่ละประเทศมีความสามารถในการปลูกพืชต่างกัน จึงนิยมใช้วัตถุดิบต่างกันดังภาพที่ 2-2 ประเทศผู้ผลิตไบโอดีเซลเพื่อการค้ารายหลักของโลกคือ ประเทศในกลุ่มยุโรป รองลงมาเป็นประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากประเทศแถบทวีปอเมริกานิยมทำไบโอเอทานอลมากกว่าไบโอดีเซล (Lora E.S. และคณะ, 2009)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 2-1 คุณสมบัติในการปลูกพืชเป็นวัตถุดิบสำหรับไบโอดีเซล (Lora E.S. และคณะ, 2009)

ชนิดพืช	ดิน	น้ำ	แร่ธาตุ	สภาพภูมิอากาศ
ปาล์มน้ำมัน (Palm)	ระบายน้ำดี, pH อยู่ระหว่าง 4 ถึง 7, พื้นราบ, หน้าดินลึก	ต้องการฝนปริมาณ 1800 ถึง 5000 มิลลิเมตรต่อปี	ต้องการแร่ธาตุต่ำ	เหมาะกับเขตร้อนชื้น อุณหภูมิประมาณ 25 ถึง 32°c
ต้นเรฟซีดหรือผักกาดก้านขาว (Rapeseed)	ดินนุ่มคล้ายโคลน, ระบายน้ำได้ดี	ต้องการฝนอย่างน้อย 600 มิลลิเมตรต่อปี	ต้องการแร่ธาตุสูง	อุณหภูมิ 15 ถึง 20°c
ถั่วเหลือง (Soybean)	มีความชุ่มน้ำสูง, มีปริมาณสารอินทรีย์พอเหมาะ	ต้องการน้ำปริมาณมาก	pH 6 ถึง 6.5	เหมาะกับเขตร้อนชื้นหรือมีสภาพอากาศกลางๆ

ชนิดพืช	ดิน	น้ำ	แร่ธาตุ	สภาพภูมิอากาศ
ละหุ่ง (Castor)	pH อยู่ระหว่าง 5 ถึง 6.5	ต้องการฝนอย่างน้อย 400 มิลลิเมตร ในช่วงเพาะเมล็ดและช่วงออกดอก	ต้องการแร่ธาตุที่สำคัญโดยเฉพาะ N, K, P, Ca และ Mg	เหมาะกับเขตร้อนชื้น อุณหภูมิประมาณ 20 ถึง 30°c
สบู่ดำ (Jatropha curcas)	ดินไม่ชื้นหรือแห้งเกินไป	ต้องการฝนอย่างน้อย 400 มิลลิเมตรต่อปี	ต้องการแร่ธาตุต่ำ	อุณหภูมิเฉลี่ย 20°c แต่ไม่เกิน 28°c

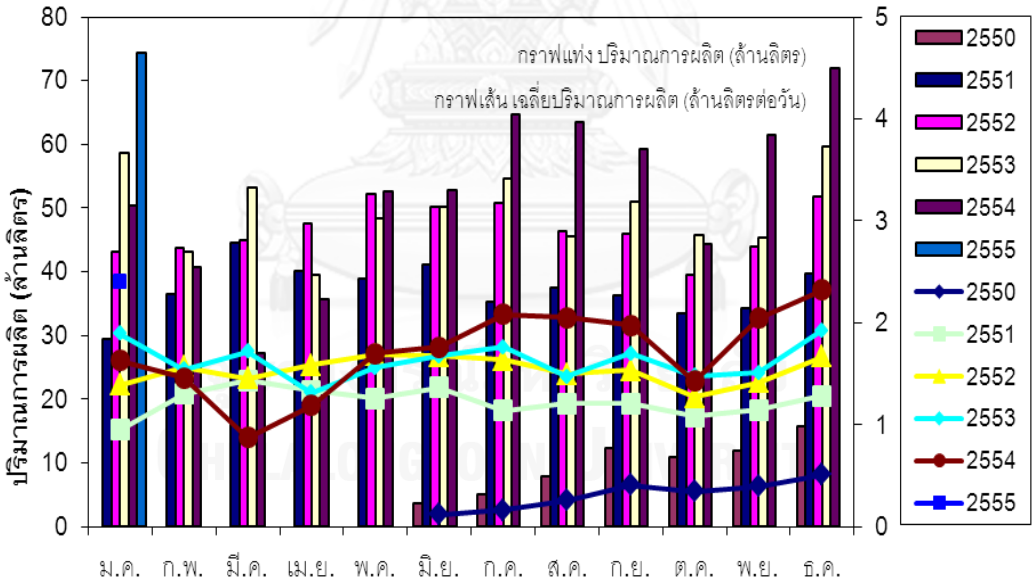


ภาพที่ 2-2 วัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตไบโอดีเซลในแต่ละประเทศ (Lin L. และคณะ, 2011)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล 11 ถึง 17 เท่า ถ้าใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงจะทำให้เกิดปัญหาด้านการหล่อลื่น หัวฉีดทำการฉีดพ่นน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก เกิดการสะสมของคาร์บอน และระบบอัดฉีดเกิดการอุดตันได้ ดังนั้นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นการแก้ไขข้อจำกัดของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์โดยตรง การลดความหนืดของน้ำมันพืชสามารถทำได้ 4 วิธีดังนี้ 1) วิธีผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลโดยตรง 2) วิธีไมโครอิมัลชัน 3) วิธีไพโรไลซิส 4) วิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ข้อดีของไบโอดีเซลคือ สมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด ไม่เป็นพิษ ลดการเกิดเขม่า ลดการปล่อยมลพิษจากกระบวนการเผาไหม้ และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Naik S.N. และคณะ, 2006)

ประเทศไทยนั้น เป็นประเทศในเขตร้อนชื้นทำให้มีพืชที่เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซลอยู่หลากหลาย ได้แก่ มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา เมล็ดทานตะวัน สบู่ดำ ปาล์ม เป็นต้น ซึ่งในไทยนิยมใช้ปาล์มน้ำมันในการผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากมีศักยภาพสูง และมีผลผลิตภายในประเทศสูงถึง 12 ล้านตันต่อปี การริเริ่มศึกษาไบโอดีเซลในไทยเกิดเนื่องจากแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวที่ทรงเล็งเห็นถึงปัญหาการขาดแคลนน้ำมันในอนาคต จึงทรงมีพระราชดำริให้โครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดาดำเนินงานวิจัยร่วมกับหลายๆ ฝ่ายทั้งในส่วนภาครัฐและเอกชนในปี พ.ศ. 2528 ทำให้การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยพัฒนาต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งนิยมใช้วิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันเพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืช โดยมีผู้ผลิตไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (B100) ที่จดทะเบียนกับกรมธุรกิจพลังงานอยู่ถึง 14 บริษัท (พ.ศ. 2556) มีปริมาณการผลิตรวมรายปีในแต่ละเดือนแสดงดังภาพที่ 2-3 พบว่ามีแนวโน้มการผลิตที่สูงขึ้นเนื่องจากปาล์มมีราคาที่ถูกลงเมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา และราคาน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาที่สูงขึ้น โดยต้องมีคุณภาพเป็นไปตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2552



ภาพที่ 2-3 ปริมาณการผลิตไบโอดีเซล (B100) ในประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

2.3 วิธีการลดความหนืดของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ (Ghobadian B. และคณะ, 2012)

1) การผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลโดยตรง (Direct Blending) ทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลง นิยมผสมในอัตราส่วน 1:10 ถึง 2:10 ของปริมาตรน้ำมันพืชต่อน้ำมันดีเซล แต่ความหนืดที่ได้ยังคงมีมากเกินไป ทำให้เครื่องยนต์ไม่ไหลลื่น เกิดคาร์บอนสะสมได้ เนื่องจากโครงสร้างของน้ำมันพืชยังคงไม่เปลี่ยน เพราะฉะนั้นจึงเหมาะกับเครื่องยนต์สำหรับการเกษตร หรือต้องมีการปรับปรุงเครื่องยนต์ดีเซลให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้

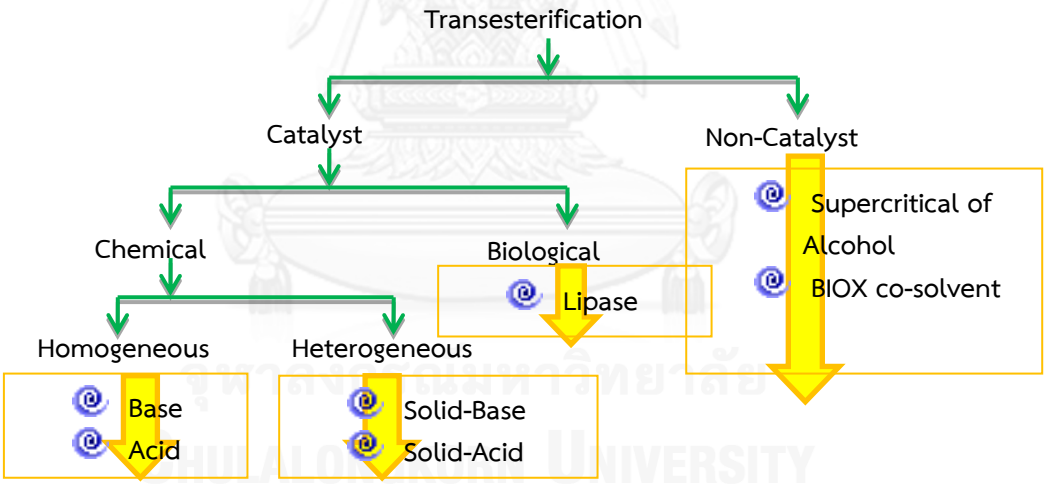
2) วิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) เป็นวิธีที่ทำให้ของเหลวผสมซึ่งปกติไม่สามารถละลายรวมกันได้ให้อยู่ในสภาวะเทอร์โมไดนามิกส์คือ ระบบสามารถเปลี่ยนสภาวะได้เองเพื่อความสมดุล เสถียร มีความโปร่งแสง โดยใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ช่วยทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะน้ำในน้ำมัน ซึ่งน้ำหรือในปัจจุบันใช้เอทานอลจะแพร่กระจายเป็นอนุภาคเล็กๆ ขนาดประมาณ 1 ถึง 150 นาโนเมตร กระจายอยู่ในน้ำมันพืชหรือน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจึงทำให้ความหนืดต่ำลง ค่าซีเทนเพิ่มมากขึ้น เมื่อเชื้อเพลิงชีวภาพเข้าสู่ตัวเครื่องยนต์จะเกิดการกระจายตัวของน้ำมันเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ทำให้ละอองน้ำมันมีขนาดเล็กลง พื้นที่ผิวสัมผัสอากาศมีมากขึ้น มีการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น ทำให้เกิดควันและปริมาณฝุ่นละอองที่ปล่อยออกมาลดลง อีกทั้งไม่เกิดของเสียจากกระบวนการผลิต แต่มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดคาร์บอนสะสมในเครื่องยนต์ปริมาณมาก อาจเกิดการอุดตันที่หัวฉีดเครื่องยนต์ได้

3) วิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นการใช้ความร้อนทำปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ไปเป็นไบโอดีเซล ซึ่งเป็นวิธีที่คล้ายกับการกลั่นปิโตรเลียม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยหรือไม่ก็ได้ ทำให้ความหนืดต่ำลง ค่าซีเทนเพิ่มขึ้น มีความหลากหลายของปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ดังนั้นวิธีนี้จึงยากที่จะควบคุมผลผลิตให้ได้ตามที่ต้องการ ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและเครื่องมือที่เฉพาะ อีกทั้งใช้พลังงานสูงในการผลิตไบโอดีเซลออกมา เพราะฉะนั้นจึงมีต้นทุนในการผลิตสูง

4) ทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification or Alcoholysis) เป็นวิธีการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้อยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เป็นการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์กับน้ำมันพืชโดยใช้แอลกอฮอล์ จะได้อัลคิลเอสเตอร์ (Alkyl ester, Biodiesel) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์รอง ซึ่งนิยมใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากต้นทุนที่ใช้ไม่สูงมาก ควบคุมการผลิตได้ง่าย แต่ต้องมีความระมัดระวังไม่ให้เกิดสบู่ในระหว่างทำปฏิกิริยามากเกินไป เพราะสบู่จะลดประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความหนืดสูงขึ้นและยากต่อการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลได้ ทำให้กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันมีแนวทางอื่นๆ เพื่อลดข้อเสียเหล่านี้ถูกเสนอและทำเป็นงานวิจัยมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ในสภาวะวิกฤติ เป็นต้น

2.4 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

การนำน้ำมันพืชมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1853 โดยนักวิทยาศาสตร์ ดัฟฟี่และแพทริก (E. Duffy และ J. Patrick) ก่อนที่จะมีการสร้างเครื่องยนต์ดีเซลขึ้น เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันจึงถูกพัฒนาอย่างหลากหลายมากขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 เทคโนโลยีหลักคือ มีการใช้สารเร่งปฏิกิริยา และไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถสรุปเทคโนโลยีต่างๆ ได้ดังภาพที่ 2-4 โดยเทคโนโลยีที่นิยมในปัจจุบันคือ การใช้สารเคมีเป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยเป็นสารเร่งที่มีสถานะเดียวกับน้ำมันพืชคือ เป็นของเหลว (Homogeneous catalyst) ทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นไบโอดีเซล จึงนิยมมากกว่าสารเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับน้ำมันพืช ก็คือเป็นของแข็ง (Heterogeneous catalyst) แต่สารเร่งปฏิกิริยาที่ต่างสถานะนี้มีข้อดีคือ ง่ายต่อการแยกตัวเร่งและการนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนวิธีอื่นๆ นั้นได้แก่ การไม่ใช้สารเร่ง การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นสารเร่ง ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้เป็นวิธีใหม่ที่น่าสนใจ อาจถูกนำไปพัฒนาและใช้ในอนาคตได้ มีข้อดีข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-4 เทคโนโลยีต่างๆ ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

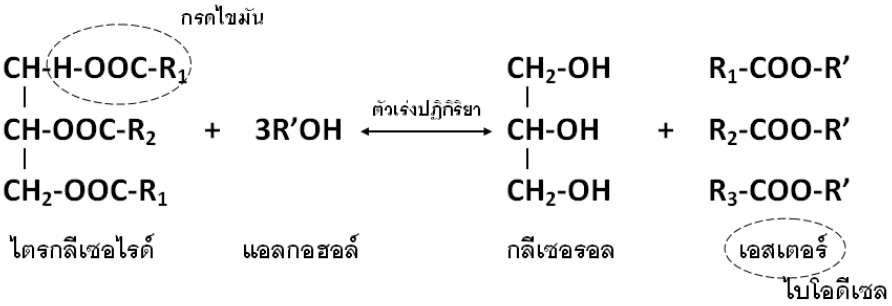
ตารางที่ 2-2 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีต่างๆ ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Ghobadian B. และคณะ, 2012)

เทคโนโลยี	**วิธีการ**	**ข้อดี**	**ข้อเสีย**
Homogeneous base catalyst	ใช้ตัวเร่งเบส (ของเหลว)	- ควบคุมการผลิตง่าย - ต้นทุนต่ำ - ประสิทธิภาพสูง	- เหมาะกับน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันน้อย - เกิดสบู่ได้
Homogeneous acid catalyst	ใช้ตัวเร่งกรด (ของเหลว)	- ใช้ได้กับกรดไขมันสูงได้	- กัดกร่อนวัสดุ - ต้องปรับ pH หลังทำปฏิกิริยา - ใช้เวลานาน
Heterogeneous solid-base	ใช้ตัวเร่งเบส (ของแข็ง)	- นิยม CaO เพราะ ราคาถูก อายุใช้งานนาน	- อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า
Heterogeneous solid-acid	ใช้ตัวเร่งกรด (ของแข็ง)	- ลดปัญหาการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับตัวเร่งสารละลายกรด - แยกตัวเร่งออกได้ง่าย - ใช้กับกรดไขมันสูงได้	- ลงทุนสูง - ปฏิกิริยาต่ำ - ใช้แอลกอฮอล์มาก
Lipase biocatalyst	ใช้ตัวเร่งเอนไซม์ไลเปส	- แยกกลีเซอรอลออกง่าย - ไม่มีของเสียจากกระบวนการ - อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก	- ค่าใช้จ่ายสูง เพราะเอนไซม์ราคาแพง - ใช้เวลานาน ถ้าเวลานานเกินไปประสิทธิภาพเอนไซม์จะลดลง
Supercritical of alcohol	ทำปฏิกิริยาที่สภาวะสูงกว่าภาวะวิกฤติของแอลกอฮอล์	- ใช้เวลาน้อย - อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง	- ใช้อุณหภูมิและความดันสูงมาก - ใช้แอลกอฮอล์มาก - ลงทุนสูง
BIOX Co-solvent	ใช้สารเคมี (Co-solvent)เป็นตัวช่วยให้แอลกอฮอล์และน้ำมันพืชผสมกันดีขึ้น เช่น tetrahydrofuran	- ปฏิกิริยาเกิดเร็วมาก - นำ co-solvent กลับมาใช้ใหม่ได้ (recoverable)	- แยกแอลกอฮอล์ที่เหลือได้ยาก - co-solvent เป็นสารพิษและอันตราย

วิธีที่นิยมใช้ผลิตไบโอดีเซลกันอย่างแพร่หลายตามที่ได้กล่าวไว้แล้วนั้นคือ Homogeneous catalyst เป็นการใช้แอลกอฮอล์และตัวเร่งในการทำปฏิกิริยากับน้ำมันหรือไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล (Fatty acid alkyl esters) และกลีเซอรอล โดยมีกลไกดังภาพที่ 2-5 ซึ่งการจะเลือกใช้ตัวเร่งเป็นกรดหรือเบสมีข้อเปรียบเทียบดังตารางที่ 2-3 การ

เลือกจะใช้ตัวเร่งชนิดใดนั้น ขึ้นกับวัตถุดิบและความสามารถในการลงทุน ถ้าวัตถุดิบหรือน้ำมันพืชนั้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) จำนวนมากก็จะเลือกใช้ตัวเร่งชนิดกรด แต่ถ้าเลือกตามการลงทุน ตัวเร่งชนิดเบสจะลงทุนต่ำกว่า เนื่องจากมีค่าสัดส่วนแอลกอฮอล์กับน้ำมัน (Alcohol/oil molar ratio) ต่ำกว่าตัวเร่งชนิดกรด แสดงว่าใช้ปริมาณแอลกอฮอล์น้อยกว่า จึงมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ Homogeneous base catalyst จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ซึ่งมีกระบวนการหลักแสดงดังภาพที่ 2-6 ในขั้นตอน Separation เป็นการแยกเอสเตอร์กับกลีเซอรอลอาจใช้แรงเหวี่ยงในการแยกหรือปล่อยทิ้งให้แยกชั้นก็ได้ ขั้นตอนการทำกลีเซอรอลและแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์มักใช้วิธีการกลั่น ส่วนขั้นตอนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Leung D.Y.C. และคณะ, 2010) สามารถทำได้ 4 วิธีดังนี้

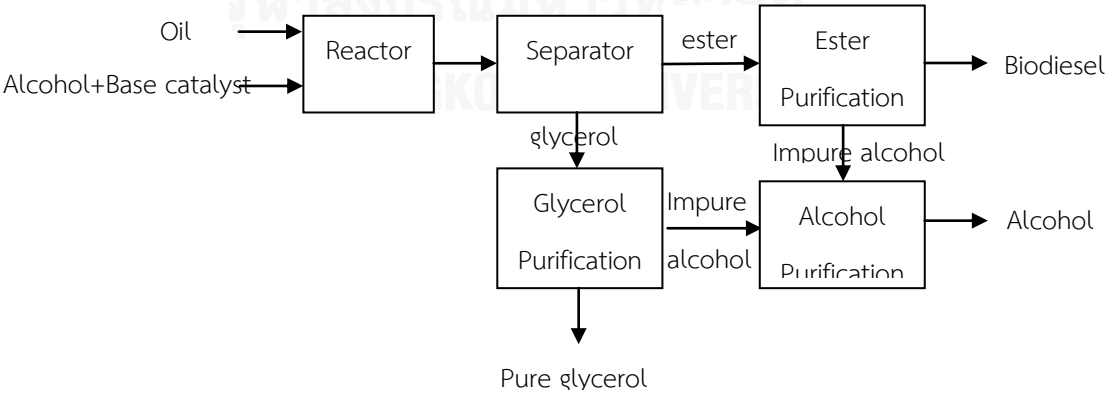
1) การใช้น้ำล้าง (Water Washing) ดังภาพที่ 2-7 เมื่อแยกเอสเตอร์ออกจากกลีเซอรอลในขั้นตอน Separation แล้ว เอสเตอร์จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นกลาง (Neutralization) เพื่อกำจัดสบู่ ลดการเกิดสภาวะอิมัลชันขณะใช้น้ำล้าง จากนั้นจะนำแอลกอฮอล์ที่คงเหลือออกไปจากเอสเตอร์โดยใช้วิธีการกลั่น แล้วทำการล้างด้วยน้ำอุ่น 49 ถึง 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 4 ถึง 5 ครั้ง เพื่อดึงกลีเซอรอลและแอลกอฮอล์ที่ยังเหลืออยู่ออกจากเอสเตอร์ให้ออกไปกับน้ำทิ้ง เนื่องจากกลีเซอรอลและแอลกอฮอล์ละลายได้ดีมากในน้ำ อีกทั้งช่วยกำจัดสบู่ กำจัดเกลือออกไปได้ด้วย แล้วทำการกำจัดน้ำออกจากเอสเตอร์ซึ่งทำได้หลายวิธีเช่น การปล่อยให้แยกชั้น การใช้แรงเหวี่ยง (Centrifuge) การใช้ซิลิกาเจล เป็นต้น
2) การกลั่น (Distillation) เป็นวิธีที่ใช้พลังงานสูงกว่าการใช้น้ำล้าง แต่ไม่ก่อให้น้ำเสียและจะได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยขั้นแรกจะทำการกลั่นไล่แอลกอฮอล์ก่อนกลั่นอีกครั้งเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลออกมา แสดงกระบวนการดังภาพที่ 2-8
3) การล้างแห้ง (Dry Washing) เป็นการใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือใช้วิธีแมกนีซอล (Magnesol Process) โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตแยกแอลกอฮอล์ออกจากเอสเตอร์ได้เป็นไบโอดีเซลออกมา ซึ่งวิธีแมกนีซอลนี้สามารถกำจัดเมทานอลได้ดีกว่าวิธีแลกเปลี่ยนไอออน
4) การใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) เช่น โพลีซัลโฟน (Poly sulfone) มีข้อดีคือ ลดโอกาสการเกิดสภาวะอิมัลชัน และมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 90



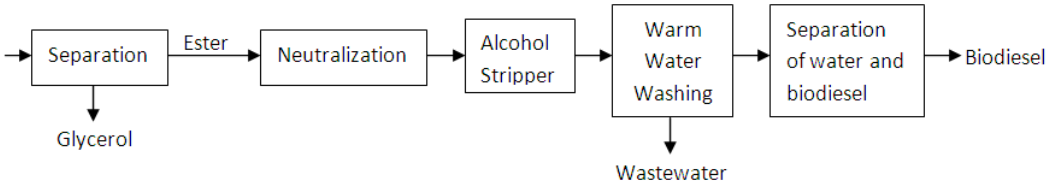
ภาพที่ 2-5 กลไกการเกิดไบโอดีเซลด้วย Homogeneous catalyst

ตารางที่ 2-3 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Ghobadian B. และคณะ, 2012)

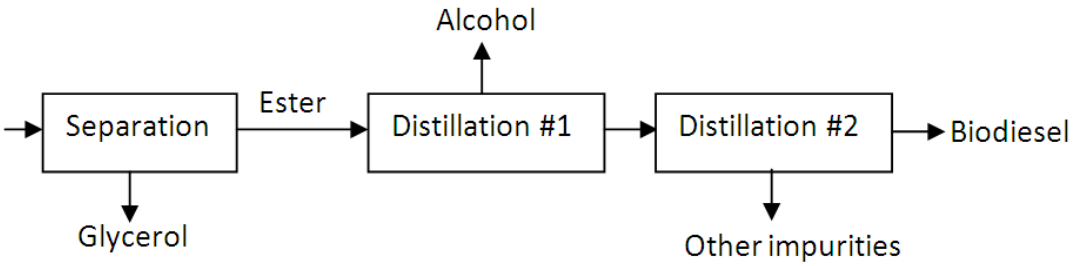
	ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส	**ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด**
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยม	NaOH, KOH	H_2SO_4, HCl
กรดไขมันอิสระ	ควรไม่เกิน 3% โดยน้ำหนัก	สูง
อุณหภูมิ	20-75 °c (โดยทั่วไป 60°c)	50-150°c
ความดัน	0.14-0.41 MPa	0.4 MPa
เวลาในการเกิดปฏิกิริยา	ทั่วไป 1 ชั่วโมง	ทั่วไป 4 ชั่วโมง
ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเป็นเอสเตอร์	98%	97%
อัตราส่วนแอลกอฮอล์กับน้ำมัน (Alcohol/oil molar ratio)	3:1-9:1 (ทั่วไป 6:1)	30:1-50:1
การลงทุน	ลงทุนต่ำกว่า	ลงทุนสูงกว่า



ภาพที่ 2-6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี Homogeneous base catalytic transesterification



ภาพที่ 2-7 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีใช้น้ำล้าง (Water Washing)



ภาพที่ 2-8 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการกลั่น (Distillation)

2.5 น้ำมันปาล์ม

ปาล์มน้ำมันที่ปลูกในประเทศไทยเป็นชนิดที่นิยมปลูกเพื่อการค้า มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Elaeis guineensis* Jacq มีถิ่นกำเนิดจากแถบทวีปแอฟริกา แล้วนำเข้ามาในไทยโดยผ่านทางประเทศอินโดนีเซียและประเทศมาเลเซียประมาณปี พ.ศ.2470 ปาล์มน้ำมันชนิดนี้ปลูกได้ดีในสภาพอากาศที่ร้อนชื้นและจากตารางที่ 2-1 ปาล์มน้ำมันจึงเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งที่เหมาะแก่การเพาะปลูกในประเทศไทย หลังจากการปลูกจะเริ่มให้ผล (ทะลายเล็ก) เมื่ออายุประมาณ 30 เดือน และให้ผลเต็มที่ (ทะลายใหญ่) เมื่ออายุ 5 ปีขึ้นไป มีรอบการเก็บเกี่ยวประมาณ 15 วันต่อครั้ง น้ำหนักเฉลี่ยควรมากกว่า 15 กิโลกรัมต่อทะลาย ผลปาล์มจะให้น้ำมันได้จาก 2 ส่วนคือ เปลือกปาล์ม (mesocarp, fiber) และเมล็ด (endosperm, kernel) ดังภาพที่ 2-9 น้ำมันที่ได้จากเปลือกปาล์มเรียกว่า น้ำมันเนื้อปาล์ม (Crude palm oil, CPO) น้ำมันที่ได้จากเมล็ดปาล์มเรียกว่า น้ำมันเมล็ดปาล์ม (Crude palm kernel oil, CPKO) โดยโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจะนำผลปาล์มสดทั้งทะลาย (Fresh fruit bunches, FFB) ไปอบไอน้ำ (Sterilizer) เพื่อผลปาล์มหลุดจากทะลาย และแยกเปลือกกับเมล็ดได้ง่ายขึ้น แล้วนำไปผ่านกระบวนการบดอัด (Thresher) การย่อย (Digester) แล้วแยกเศษต่างๆ ออก จะได้น้ำมันปาล์มดิบได้แก่ CPO และ CPKO (Chavalparit O. และคณะ, 2006) ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-4 จากนั้นนำไปผ่านกระบวนแยกส่วน (Fractionation)

เพื่อให้ได้ไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกันคือ ส่วนที่เป็นไขปาล์ม (Palm stearin) และส่วนที่เป็นน้ำมันใส (Palm Olein) ต่อมาทำการกลั่นน้ำมันให้บริสุทธิ์ ซึ่งจะทำการกลั่น การฟอก และการกำจัดกลิ่น จะได้น้ำมันปาล์มที่คุณภาพดีขึ้น (Refined Bleached Deodorized palm oil, RBD PO) เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน น้ำมันหรือไขปาล์มควรมีกรดไขมันอิสระไม่เกินร้อยละ 1 เพื่อจะได้ไม่สิ้นเปลืองสารเร่งปฏิกิริยา คุณสมบัติน้ำมันปาล์มทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญเช่น ค่าความหนืด ความหนาแน่น เป็นต้น จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับอุณหภูมิ ดังตารางที่ 2-5 อัตราการผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศไทยนั้นสามารถผลิตได้มากกว่า 1,000,000 ตันต่อปี ซึ่งผลิตได้มากเป็นอันดับ 3 ของโลกดังตารางที่ 2-6 แต่ไทยยังมีการนำเข้าน้ำมันปาล์มอยู่มาก เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการสูง

ภาพที่ 2-9 ส่วนประกอบของปาล์มน้ำมัน (USDA., 2007)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-4 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบ (Ghaly A.E. และคณะ, 2010)

กรดไขมัน	**สัญลักษณ์**	**โครงสร้าง**	**ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)**
Linolenic	C18:3	CH_3-$(CH_2CH{=}CH)_3(CH_2)_7$-COOH	0.2
Linoleic	C18:2	CH_3-$(CH_2)_3(CH_2CH{=}CH)_2(CH_2)_7$-COOH	10.1
Oleic	C18:1	CH_3-$(CH_2)_7CH{=}CH(CH_2)_7$-COOH	40.5
Stearic	C18:0	CH_3-$(CH_2)_{16}$-COOH	4.4
Palmitoleic	C16:1	$CH_3(CH_2)_5CH{=}CH(CH_2)_7$-COOH	0.3
Palmitic	C16:0	CH_3-$(CH_2)_{14}$-COOH	42.6
Other			1.9

ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติน้ำมันปาล์ม

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (mPas)	ค่าความร้อน (KJ/kg-°C)	การนำไฟฟ้า (W/m-°C)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความหนืด (cST)
25	77.19	1.861	0.1721	887.5	86.97
30	57.85	1.875	0.1717	885.0	65.37
35	44.68	1.888	0.1712	882.5	50.63
40	35.41	1.902	0.1708	880.0	40.24
45	28.68	1.916	0.1704	877.5	32.68
50	23.68	1.930	0.1699	875.1	27.06
55	19.88	1.944	0.1695	872.6	22.78
60	16.93	1.959	0.1691	870.2	19.46
65	14.61	1.973	0.1687	867.8	16.84
70	12.75	1.988	0.1683	865.4	14.73
75	11.23	2.003	0.1679	863.1	13.01
80	9.99	2.018	0.1675	860.7	11.61
85	8.955	2.034	0.1671	858.4	10.43
90	8.087	2.049	0.1668	856.1	9.45
95	7.351	2.065	0.1664	853.8	8.61
100	6.721	2.081	0.1660	851.6	7.89

ตารางที่ 2-6 ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์ม (USDA., 2013)

	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	พฤษภาคม 2013/14
การผลิต	หน่วย พันตัน					
อินโดนีเซีย	20,500	22,000	23,600	26,200	28,500	31,000
มาเลเซีย	17,259	17,763	18,211	18,202	19,000	19,000
ไทย	1,540	1,287	1,832	1,892	2,000	2,100
โคลัมเบีย	795	770	750	915	960	1,000
ไนจีเรีย	850	850	850	850	910	930
อื่นๆ	3,110	3,211	3,435	3,796	3,921	4,043
รวม	44,054	45,881	48,678	51,855	55,291	58,073

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6 มาตรฐานไบโอดีเซล

มาตรฐานไบโอดีเซลเริ่มมีครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1997 คือ DIN 51606 เป็นมาตรฐานของเยอรมัน ต่อมาอเมริกาและแคนาดาได้ตั้งมาตรฐาน ASTM D6751 ขึ้นในปี ค.ศ.2002 และยุโรปได้จัดตั้งมาตรฐาน EN 14214 ในปี ค.ศ.2003 เพื่อใช้เป็นมาตรฐานแก่ประเทศในแถบยุโรป แล้วมีการปรับปรุงเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน มาตรฐานเหล่านี้ได้กลายเป็นต้นแบบในการกำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลในหลายๆ ประเทศ (Lin L. และคณะ, 2011) สำหรับประเทศไทยก็ได้นำมาใช้เช่นกัน ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2552 ได้ระบุไว้ดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 มาตรฐานไบโอดีเซลในประเทศไทย

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเตอร์ (%wt)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN14130
2	ความหนาแน่น อุณหภูมิ 15°c (kg/m^3)	ไม่ต่ำกว่า	860	ASTM D 1298
		ไม่สูงกว่า	900	
3	ความหนืด อุณหภูมิ 40°c (cSt)	ไม่ต่ำกว่า	3.5	ASTM D 445
		ไม่สูงกว่า	5.0	
4	จุดวาบไฟ (°c)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.050	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0024	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิ 110°c (hr)	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (g Iodine / 100 g)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเตอร์ (%wt)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมโนกลีเซอไรด์ (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรีนอิสระ (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
21	กลีเซอรีนทั้งหมด (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (Na+K) (mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 & EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (Ca+Mg) (mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

2.7 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA)

LCA หรือการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization, ISO) ได้ให้คำนิยาม LCA ไว้ในอนุกรม ISO14040 ว่า เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต ซึ่ง LCA เป็นเครื่องมือที่ใช้ประเมินค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พิจารณาถึงผลกระทบในทุกประเด็นโดยมีผลเชิงปริมาณที่ชัดเจน ทำให้มีความแตกต่างจากเครื่องมือวิเคราะห์ผลกระทบอื่นๆ ดังตารางที่ 2-8 ดังนั้น LCA จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกิจกรรมได้หลากหลายได้แก่ ภาคอุตสาหกรรมหรือเอกชน ภาครัฐ องค์กรอิสระ และกลุ่มผู้บริโภค โดยนำไปใช้งานดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-8 ลักษณะเครื่องมือวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547)

เครื่องมือ	ขอบเขตการใช้งาน	กระบวนการทางเศรษฐศาสตร์	ข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์	ข้อจำกัดด้านเวลา
การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)	ผลิตภัณฑ์/ หน้าที่ของผลิตภัณฑ์	Full chain process	ไม่มีข้อจำกัด	ไม่มีข้อจำกัด
การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment: EIA)	โรงงาน/ ระบบสาธารณูปโภค	Non chain process	เฉพาะตำแหน่งที่ตั้ง	ระบุแน่นอน
การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment: RA)	โรงงาน	Non chain process	เฉพาะตำแหน่งที่ตั้ง	ระบุแน่นอน

เครื่องมือ	ขอบเขตการใช้งาน	กระบวนการทางเศรษฐศาสตร์	ข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์	ข้อจำกัดด้านเวลา
การวิเคราะห์การไหลของสาร (Substance Flow Analysis: SFA)	สาร (Substance)	All process in region	เฉพาะพื้นที่	ขึ้นกับผู้ใช้กำหนด
การประเมินเทคโนโลยี (Technology Assessment: TA)	เทคโนโลยี	Partial chain/ Full chain	ไม่มีข้อจำกัด	ไม่มีข้อจำกัด
การตรวจประเมินด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Audit: EA)	บริษัท	Non chain/ partial chain	เฉพาะสถานที่ตั้ง/ บางครั้งไม่มีข้อจำกัด	ขึ้นกับผู้ใช้กำหนด

ตารางที่ 2-9 รูปแบบการนำการประเมินวัฏจักรชีวิตไปใช้งาน (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547)

กลุ่มผู้นำไปใช้งาน	การประยุกต์ใช้งาน
ภาคอุตสาหกรรม/ เอกชน	• ใช้สื่อสารให้ทราบถึงข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ • ใช้ต่อรองกับผู้จัดหาวัตถุดิบ (Supplier) ให้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น • พัฒนากลยุทธ์ด้านการตลาด กลยุทธ์ด้านธุรกิจ และแผนการลงทุน • พัฒนากลยุทธ์ด้านนโยบาย • การจัดทำฉลากสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้บริโภคใช้ตัดสินใจเลือกซื้อ • ออกแบบ ปรับปรุงกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น • พัฒนานโยบายของผลิตภัณฑ์ว่าต้องการให้ไปในทิศทางใด โดยการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี LCA
ภาครัฐ	• เป็นเกณฑ์ในการจัดทำข้อกำหนดของฉลากสิ่งแวดล้อม • การพัฒนาและจัดทำฉลากสิ่งแวดล้อมประเภทที่ 3 • พัฒนาระบบการฝาก-การขอคืน (Deposit-refund systems) • ใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อสนับสนุนเงินทุนหรือการจัดทำโครงสร้างภาษีอากร • พัฒนานโยบายทั่วไปของภาครัฐ
องค์กรอิสระ (NGOs)	• เป็นข้อมูลเพื่อเผยแพร่ต่อผู้บริโภค • เป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการประชุม/สัมมนาในเวทีสาธารณะ • ใช้ข้อมูลเพื่อกดดันภาคเอกชนและรัฐบาลในการพัฒนาสิ่งแวดล้อม
ผู้บริโภค	• ใช้ข้อมูลเพื่อประกอบการการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์

ประวัติความเป็นมาของ LCA ในปี ค.ศ.1965 เริ่มมีแนวคิดศึกษาผลกระทบตลอดชีวิตของผลิตภัณฑ์ และจากการเกิดวิกฤติพลังงานในช่วงปี ค.ศ.1970 ทำให้เกิดจิตสำนึกในการรักษาสิ่งแวดล้อม LCA จึงถูกพัฒนาควบคู่ไปกับแนวคิดในการใช้ทรัพยากรและพลังงานอย่างคุ้มค่า และเริ่ม

ใช้ LCA อย่างแพร่หลายมากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 โดยถูกนำมาใช้ในการกำหนดกลยุทธ์ กำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม อีกทั้งมีการพัฒนาโปรแกรมต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการประเมินผลกระทบมากขึ้น สำหรับในประเทศไทยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย (TEI) และกรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้ทำการเผยแพร่ความรู้ด้าน LCA สู่ภาคอุตสาหกรรมไทยตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 (ค.ศ.1997)

อนุกรมมาตรฐาน ISO14040 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับ LCA ประกอบด้วย 7 หัวข้อดังนี้

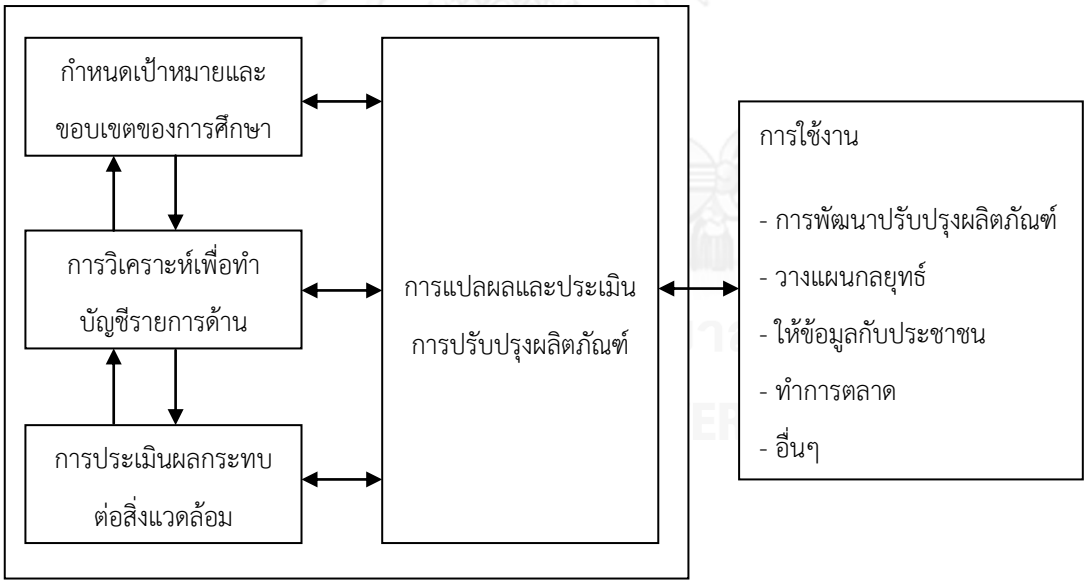
- ISO14040 Principles and framework เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงหลักการ นิยามศัพท์ และกรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO14041 Goal and scope definition and Life Cycle Inventory (LCI) เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต การวิเคราะห์และจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์
- ISO14042 Life Cycle Impact Assessment (LCIA) กล่าวถึงการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO14043 Life Cycle Interpretation กล่าวถึงการแปลผลข้อมูลที่ได้จากการทำ LCI และ LCIA
- ISO14044 Requirements and Guidelines for LCA
- ISO14047 Illustrative examples on how to apply ISO14042 เป็นการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO14042 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO14048 LCA Data Documentation Format เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างรูปแบบเอกสารของข้อมูลด้าน LCA
- ISO14049 Examples of application of ISO14041 to goal and scope definition and inventory analysis เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14041 สำหรับจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

วิธีการในการประเมินวัฏจักรชีวิตหรือ LCA ต้องมีการจัดการกับข้อมูลจำนวนมาก สามารถนำมาคิดและคำนวณได้ด้วยตนเองหรือทำการคำนวณผลด้วยโปรแกรม ยกตัวอย่างโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในปัจจุบันเช่น GaBi ของประเทศเยอรมัน SigmaPro ของประเทศเนเธอแลนด์ EcoPro ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เป็นต้น โดยมีกรอบการดำเนินงานตาม ISO14040 ดังภาพที่ 2-10 เริ่มจากการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาเช่น เพื่อวิเคราะห์จุดอ่อนจุดแข็งของผลิตภัณฑ์ เพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ เพื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เป็นต้น โดยต้องมีความชัดเจน ไม่คลุมเครือ สอดคล้องกับการนำไปใช้งาน ต้องมีการระบุหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ ระบุหน่วยการทำงาน (Functional Unit) เพื่อให้ข้อมูลสารขาเข้าขาออกมีปริมาณตั้งอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน เพื่อสามารถนำมา

เปรียบเทียบกันได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม โดยทำการเก็บ รวบรวมข้อมูล ลักษณะของข้อมูล แผนผังการไหลของกระบวนการ (Flow Diagram) แล้วทำการประเมินผล แปลผล ปรับปรุง ก่อนนำไปใช้งาน

หน่วยการทำงาน หรือหน่วยหน้าที่ (Functional Unit) แสดงถึงหน้าที่หลักของผลิตภัณฑ์ แล้วระบุเป็นปริมาณ เพื่อสามารถใช้เป็นฐานอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นที่มีหน้าที่เดียวกันได้ ดังนั้นต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเปรียบเทียบได้อย่างยุติธรรม

การเก็บข้อมูลและทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory, LCI) เป็นการทำแผนผังการไหลของกระบวนการ โดยต้องระบุปริมาณ และแหล่งที่มาของข้อมูลให้ชัดเจนแบ่งเป็นข้อมูลปฐมภูมิ ข้อมูลทุติยภูมิ และข้อมูลจากการคำนวณ ซึ่งข้อมูลปฐมภูมิน่าเชื่อถือที่สุดเนื่องจากเป็นได้จากการสอบถาม การสัมภาษณ์ หรือได้จากการตรวจวัดโดยตรง ส่วนข้อมูลจากการคำนวณ เช่น การคำนวณตามหลักสมการเคมี โดยถือว่าเป็นคุณภาพต่ำที่สุด ซึ่งจะต้องมีการระบุวิธีการการได้มาซึ่งข้อมูลว่าได้จากการวัด การสอบถาม เป็นต้น ในกรณีที่มีหลายผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจะมีการใช้วิธีการปันส่วน เพื่อแบ่งปริมาณสารขาเข้าที่จะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์นั้นๆ แต่ไม่ควรปันส่วนถ้าเป็นไปได้ วิธีที่ใช้ในการปันส่วนได้แก่ การปันส่วนเชิงกายภาพเช่น แบ่งโดยมวล โดยปริมาตร เป็นต้น การปันส่วนเชิงมูลค่า และการปันส่วนเชิงเทคนิค



ภาพที่ 2-10 กรอบการดำเนินงานประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ ISO14040

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) เป็นขั้นตอนการประเมินระดับผลกระทบว่าผลกระทบด้านใดที่มีความสำคัญต่อระบบผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาอยู่ โดยทำการแปลข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปของผลกระทบที่เข้าใจได้ง่าย และสามารถใช้เปรียบเทียบกันได้ ซึ่งแบ่งผลกระทบออกเป็น 2 ขั้นคือ 1) ผลกระทบขั้นกลาง (Midpoint Impact) เป็นผลที่แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม เช่น สภาวะโลกร้อน การทำลายโอโซน เป็นต้น 2) ผลกระทบขั้นปลาย (Endpoint Impact) เป็นผลต่อเนื่องจากผลกระทบขั้นกลางที่แสดงถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้น เช่น ความเสียหายต่อสุขภาพมนุษย์ ต่อระบบนิเวศ ต่อทรัพยากรธรรมชาติ เป็นต้น

ขั้นตอนการประเมินผลกระทบมีดังนี้ 1) การกำหนดประเภทผลกระทบ (Category Definition) เป็นการเลือกผลกระทบที่ต้องการศึกษา อาจเป็นผลกระทบขั้นกลางหรือปลายก็ได้ 2) การจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) เป็นการนำข้อมูลที่มีกระจายสู่ผลกระทบที่ต้องการศึกษาต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ 3) การกำหนดบทบาท (Characterization) เป็นการทำข้อมูลให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน เช่น หน่วย $kgCO_2$ สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบโลกร้อน เป็นต้น 4) การจัดกลุ่มเทียบหน่วย (Normalization) เป็นการปรับเทียบโดยใช้ค่าเฉพาะของแต่ละประเทศ (Normalization value) ซึ่งไม่มีค่าที่เป็นสากล และมีค่าต่างกันไปในแต่ละกลุ่มผลกระทบ ทำให้สามารถเห็นได้ถึงผลกระทบแต่ละกลุ่มมีความสำคัญต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมอยู่ในระดับใด 5) การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) เป็นการให้ความสำคัญต่อกลุ่มผลกระทบ ซึ่งแต่ละกลุ่มอาจมีน้ำหนักความสำคัญเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยส่วนใหญ่ค่าน้ำหนักนี้ขึ้นอยู่กับการกำหนดนโยบายของผู้บริหาร เพื่อช่วยในการตัดสินใจว่าผลิตภัณฑ์ใดส่งผลกระทบน้อยกว่าในภาพรวม

ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปมักนิยมทำสิ้นสุดแค่ขั้นตอนที่ 3 คือการกำหนดบทบาท เนื่องจากค่าที่ใช้สำหรับการจัดกลุ่มเทียบหน่วยได้จากการวิจัยผลกระทบและขึ้นกับจำนวนประชาการ ดังนั้นค่าเทียบหน่วยจึงเป็นค่าเฉพาะแต่ละประเทศ และการให้น้ำหนักความสำคัญก็ขึ้นอยู่กับนโยบายการบริหารที่ต่างกันไปในแต่ละประเทศหรือบริษัท เพราะฉะนั้นจึงไม่นิยมทำ ถือว่าไม่ใช่ขั้นตอนหลักในการทำ LCA

การศึกษา LCA มีประโยชน์และข้อจำกัดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 ข้อดีและข้อจำกัดของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment)

ข้อดี	ข้อจำกัด
- เป็นการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ สามารถนำมาเปรียบเทียบผลได้อย่างชัดเจน - เป็นการมองภาพรวมของผลกระทบทั้งระบบในทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง - สามารถบ่งชี้ถึงประเด็นปัญหาที่ก่อให้เกิดผลกระทบและขั้นตอนหลักที่ก่อผลกระทบได้ - ใช้เป็นข้อมูลในการวางแผน ปรับปรุง กำหนดนโยบาย หรือใช้ออกแบบผลิตภัณฑ์ให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น - ใช้เป็นเครื่องมือเพื่อลดการกีดกันทางการค้า - เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกซื้อสินค้าของผู้บริโภค	- ค่าใช้จ่ายสูง - การเก็บข้อมูลทำได้ยาก เช่น ค่าปริมาณสารจากโรงงาน ค่าที่ใช้ในการแปลงหน่วยในขั้นตอนการกำหนดบทบาท (Characterization) เป็นต้น - ใช้เวลานาน - ความไม่ครบถ้วนของข้อมูลที่สามารถหาได้ เนื่องจากต้องการข้อมูลจำนวนมาก - การทำ LCA เรื่องเดียวกันอาจให้ผลที่ต่างกัน หรือขัดแย้งกันได้ หากวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่ต่างกัน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related researches)

2.8.1 A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel (Harding K.G. และคณะ, 2007)

งานวิจัยนี้ทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกปาล์มจนถึงโรงงานผลิตไบโอดีเซล (Cradle to Gate) โดยศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน 5 กรณี ดังตารางที่ 2-11 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากตัวเร่งปฏิกิริยา แอลกอฮอล์ และปริมาณการนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ที่ต่างกัน โดยใช้โปรแกรม SimaPro V6 ในการคำนวณและประเมินผล ซึ่งมีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1000 kg ของไบโอดีเซล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-11 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล 5 กรณี

กรณี	1	2	3	4	5
ตัวเร่งปฏิกิริยา	NaOH	Enzyme lipase from *Candida antarctica*	NaOH	NaOH	Enzyme lipase from *Candida antarctica*
แอลกอฮอล์	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เอทานอล	เอทานอล
การนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ (Alcohol recovery)	94%	-	50%	94%	-

ผลการศึกษาพบว่า การใช้เอนไซม์ไลเปสส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทุกด้าน การนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 94 ดีกว่าร้อยละ 50 เพราะเป็นการลดการเกิดของเสียและลดการซื้อเมทานอลใหม่ ส่วนผลกระทบจากการใช้แอลกอฮอล์ต่างชนิดกัน พบว่า เมทานอลและเอทานอล ส่วนใหญ่ส่งผลกระทบใกล้เคียงกัน แต่ในด้านการเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์น้ำจืด เอทานอลจะส่งผลกระทบมากกว่าเมทานอลถึง 3 เท่า เนื่องจากเอทานอลผลิตจากน้ำตาลซึ่งถ้ารั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้น้ำเน่าเสียได้ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์เฉพาะผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนได้ผลว่ากรณี 3 ส่งผลกระทบมากที่สุด รองลงมาเป็นกรณีที่ 1 4 2 และ 5 ตามลำดับ

2.8.2 Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel (Pacca S. และคณะ, 2010)

ประเมินวัฏจักรชีวิตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสมดุลพลังงานของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกปาล์มจนถึงโรงงานผลิตไบโอดีเซล (Seed to Factory Gate) ในประเทศบราซิลเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่างประเทศ โดยใช้โปรแกรม SimaPro 7.1.8 ในการคำนวณและประเมินผล ซึ่งมีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1 เฮกแตร์ของการปลูกปาล์ม

งานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบทั้งหมด 5 งานวิจัยได้แก่ 1) Yusoff & Hansen (Malaysia, 2007) พบว่าไม่ได้ให้ข้อมูลที่ชัดเจนในภาคอุตสาหกรรมและไม่ได้แยกวิเคราะห์ในส่วนของยาปราบศัตรูพืชว่าเป็นยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือยาฆ่าสัตว์ฟันแทะ 2) Woody & Corley (Malaysia, 1991) ในขั้นตอนการเพาะปลูกกำหนดให้ใช้เครื่องจักรและพลังงานใช้เนื่องจากการขนส่งและการชลประทาน 3) Pleanjai & Gheewala (Thailand, 2009) คำนวณการเดินทางแค่การขนส่งผลปาล์มสดไปยังโรงกลั่น และไม่ได้วิเคราะห์ยาฆ่าแมลง แมกนีเซียม และโบรอน 4) Yee et al. (Malaysia, 2009) มีการพิจารณาขั้นตอนการขนส่งปุ๋ยโดยใช้น้ำมันดีเซล แต่ไม่พิจารณาในเรื่องของการใช้แรงงาน เครื่องมือ การก่อสร้างต่างๆ ยาปราบศัตรูพืช แมกนีเซียม และโบรอน 5) Angarita et al. (Colombia, 2009) ไม่ได้วิเคราะห์แยกย่อยชัดเจนในส่วนของการขนส่งและการใช้ปุ๋ย

งานวิจัยนี้สมมติให้ในขั้นตอนการปลูกปาล์มนั้นเป็นการใช้แรงงานคน ไม่ใช้เครื่องจักร และได้มีการคิดคำนวณโบรอนเข้าไปใน LCA ด้วย ทำให้พบว่าในส่วนของภาคอุตสาหกรรม (กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม และการผลิตไบโอดีเซล) ใช้พลังงาน (Energy input) มากที่สุด รองลงมาเป็นส่วนของภาคเกษตรกรรม และการขนส่ง ตามลำดับ โดยใช้พลังงานทั้งหมด 67 GJ/ha.yr ในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคเกษตรกรรมปล่อยมากที่สุดเนื่องจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน รองมาเป็นภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเมทานอล และการขนส่ง ตามลำดับ โดยปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดประมาณ 1,900 $kgCO_2eq/ha.yr$ เมื่อเปรียบเทียบกับอีก 5 งานวิจัยพบว่า การนำผลิตภัณฑ์ร่วมที่

เกิดขึ้นเช่น กากใย เศษปาล์ม เป็นต้น นำไปผลิตไฟฟ้าจะช่วยลดปริมาณการนำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่นมาใช้ และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

2.8.3 Life cycle analysis of biodiesel production (Martins F. และคณะ, 2011)

ทำการประเมินวัฏจักรและเปรียบเทียบผลกระทบของการผลิตไบโอดีเซลด้วยวัตถุดิบที่ต่างกันได้แก่ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังตารางที่ 2-12 โดยใช้โปรแกรม IMPACT2002 แต่ไม่วิเคราะห์ถึงขั้นตอนการก่อสร้าง การกระจายผลิตภัณฑ์ รวมถึงการใช้ไบโอดีเซลในการทำน้ำหล่อเย็นนั้นไม่นำมาคิดเพราะ สมมติให้มีผลกระทบน้อยมากและสำหรับ KOH ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ถือว่า K_3PO_4 ไม่เป็นของเสียเพราะ สามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยได้ แล้วทำการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตที่ต่างกัน ในแง่ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ สภาพอากาศ และทรัพยากร

ผลการศึกษาเปรียบเทียบ 6 กระบวนการดังตารางที่ 2-12 ได้ผลดังนี้คือ กระบวนการที่ใช้น้ำมันพืชบริสุทธิ์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมมากกว่าน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งมีกระทบมากกว่าร้อยละ 50 ส่วนกระบวนการที่ V มีการบำบัดน้ำมันเพื่อกำจัดกรดออกก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซล ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยสุด การใช้แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันนั้นส่งผลกระทบไม่แตกต่างกัน แต่การใช้น้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบดังกระบวนการที่ V และ VI กระทบต่อสภาพอากาศ ทรัพยากรมากสุด เพราะน้ำมันใช้แล้วมีกรดไขมันอิสระสูง กระบวนการที่ V ต้องใช้ทรัพยากรในการบำบัดกรดก่อน ส่วนกระบวนการที่ VI เป็นการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ การทำเอสเตอร์ริฟิเคชัน และการทำทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ดังนั้นทั้งสองกระบวนการจึงส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศโลก และใช้ทรัพยากรมากกว่ากระบวนการอื่น เมื่อนำมาวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า กระบวนการที่ I ดีสุด เนื่องจากใช้เมทานอลซึ่งราคาถูกมาเป็นวัตถุดิบ อีกทั้งใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งหาง่าย ราคาถูก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-12 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่จะศึกษาวิจัย

กระบวนการ	น้ำมัน	แอลกอฮอล์	ตัวเร่งปฏิกิริยา
I	น้ำมันพืชบริสุทธิ์ (Triolein; $C_{57}H_{104}O_6$)	เมทานอล	NaOH
II	น้ำมันพืชบริสุทธิ์ (Triolein; $C_{57}H_{104}O_6$)	เมทานอล	KOH
III	น้ำมันพืชบริสุทธิ์ (Triolein; $C_{57}H_{104}O_6$)	เอทานอล	KOH
IV	น้ำมันพืชบริสุทธิ์ (Triolein; $C_{57}H_{104}O_6$)	เอทานอล	NaOH
V	น้ำมันพืชใช้แล้ว+บำบัดก่อน (Triolein and Oleic acid)	เมทานอล	NaOH
VI	น้ำมันพืชใช้แล้ว (Triolein and Oleic acid)	เมทานอล	H_2SO_4

2.8.4 Environmental Evaluation of Biodiesel Production from Palm Oil in a Life Cycle Perspective (Gheewala S.H. และคณะ, 2007)

เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาสารเข้าและสารออกของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยไม่ได้ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ และการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Cradle to Gate) โดยใช้ 1 ตันของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นหน่วยการทำงาน (Functional unit)

ในขั้นตอนการปลูกปาล์มงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ปุ๋ยที่ใช้ได้แก่ แอมโมเนียมซัลเฟต หินฟอสฟอรัส โปตัสเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ยากำจัดวัชพืชใช้ Paraquat (Grammoxone) และ Glyphosate โดยใช้ 1-3 ครั้งต่อปี ยาฆ่าแมลงใช้ Furadan (Carbofuran) ซึ่งใช้สำหรับขั้นตอนการปลูกเริ่มต้นเท่านั้น เพราะเมื่อปาล์มโตแล้วแมลงไม่รบกวน ในขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มเกิดน้ำเสียจากการผลิต ซึ่งสามารถนำไปบำบัดแบบไร้อากาศ ได้ไบโอแก๊ส นำไปผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในสำนักงาน บ้านพักคนงาน เป็นต้น ส่วนขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลใช้วิธีปล่อยทิ้งให้แยกชั้น แล้วใช้น้ำล้างเพื่อทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ขึ้น ทำให้เกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตเช่นกัน ซึ่งผลการวิจัยสารเข้าและสารออกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-13 บัญชีข้อมูลของการผลิตไบโอดีเซล 1 ตัน

Parameter	Quantity	Parameter	Quantity
Raw Materials		**Energy**	
N (kg)	265-340	Steam (m^3)	1.8-3.5
P (kg)	74-95	Electricity (kWh)	360-380
K (kg)	190-240	**Air Emissions**	
Mg (kg)	48-61	Particulate (kg)	4.2-9.4
B (kg)	4-5	NO_2 (kg)	1.8-3.3
Paraquat (kg)	0.5-0.9	CO (kg)	1.5-4.1
Glyphosate (kg)	1.4-2.2	**Wastewater (m^3)**	3-4
FFB (ton)	6-7	**Solid waste**	
NaOH (kg)	6-10	Fibre (ton)	1.6-2.4
Methanol (ton)	0.15	Shell (ton)	0.3-0.5
Diesel (L)	5-13	Decanter cake (ton)	0.06-0.14
Water (m^3)	6500-10000	EFB (ton)	1.6-2.1
		Ash (ton)	0.02-0.07

Parameter	Quantity	Parameter	Quantity
		Output	
		Biodiesel (ton)	1
		Glycerol (ton)	0.32

2.8.5 Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand (Gheewala S.H. และคณะ, 2009)

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการใช้พลังงานในการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันตลอดวัฏจักรชีวิตของประเทศไทย โดยใช้ NEB (Net Energy Balance=energy output – energy input) และ NER (Net Energy Ratio= energy output ÷ energy input) เป็นตัวชี้วัด โดยมีขอบเขตการศึกษา 4 ขั้นตอนหลักคือ การปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง แล้วศึกษางานวิจัยอื่นเพื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของการผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำ (Jatropha methyl ester, JME) และจากมะพร้าว (Coconut methyl ester, CME) มีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1 ha/yr ของการปลูกปาล์ม

การศึกษานี้พบว่า การใช้พลังงาน (GJ/ha) ในการผลิตไบโอดีเซลใช้พลังงานมากที่สุด รองลงมาเป็นการขนส่ง การปลูกปาล์ม และการผลิตน้ำมันปาล์มตามลำดับ ซึ่งมีผลดังนี้

- Palm methyl ester (biodiesel)

  NEB (with co-product) = 100.84 GJ/ha
  NEB (without co-product) = 55.51 GJ/ha
  NER (with co-product) = 3.58
  NER (without co-product) = 2.42

- NEB (with co-product): JME > PME > CME
  NER (with co-product): JME > CME > PME
  NER (without co-product): CME > PME > JME

ดังนั้น PME (Palm methyl ester) จึงดีกว่า CME (Coconut methyl ester) เนื่องจากปาล์มให้ผลผลิตต่อเฮกแตร์มากกว่ามะพร้าว ส่วนสบู่ดำดีกว่ามะพร้าวและปาล์ม แต่ถ้าไม่พิจารณา

ผลิตภัณฑ์ร่วม สบู่ดำจะให้ค่า NER ต่ำที่สุด ดังนั้นในภาพรวมปาล์มจึงดีกว่าสบู่ดำ อีกทั้งรัฐบาลไทยยังมีนโยบายสนับสนุนการปลูกปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซลด้วย

2.8.6 Life cycle energy efficiency and potentials of biodiesel production from palm oil in Thailand (Malakul P. และคณะ, 2010)

ประเมินวัฏจักรชีวิตด้านพลังงานของไบโอดีเซลจากปาล์ม (Palm oil methyl ester, PME) ตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) การกลั่นน้ำมันปาล์ม และการผลิตไบโอดีเซล (Cradle to Gate) มีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1 kg ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ทำการรวบรวมข้อมูลได้ดังนี้ การปลูกปาล์ม อ้างอิงข้อมูลจากสถานที่ปลูกปาล์มทางภาคใต้ของไทยคือ จังหวัดกระบี่ ชุมพร และสุราษฎร์ธานี ในปี ค.ศ.2007 มีพื้นที่ปลูกปาล์ม 0.43 Mha ให้ผลผลิต 16.5 Mton/ha ซึ่งผลรวมของทั้ง 3 จังหวัดผลิตปาล์มได้ 1.2 Mton/yr ในการผลิตน้ำมันปาล์มดิบควรสกัดภายใน 24 ชั่วโมง เพื่อรักษาคุณภาพน้ำมันปาล์ม จึงมักตั้งโรงงานสกัดใกล้กับพื้นที่ปลูกปาล์ม ส่วนการขนส่งได้กำหนดให้มีการขนส่งวัตถุดิบสำหรับผลิตปุ๋ยผ่านทางเรือด้วยระยะทาง 13,586 km (One-way) ใช้พลังงานในการบรรทุก 0.086 MJ/ton.km ระยะทางขนส่งปุ๋ยมายังพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 865 (One-way) ขนส่งปาล์มไปยังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบ 50-170 km (Two-way) ขนส่งน้ำมันปาล์มดิบและไขปาล์มไปยังโรงงานผลิตไบโอดีเซล 1,218 km (Two-way) และ 60 km (Two-way) ตามลำดับ

จากการประเมินตลอดวัฏจักรชีวิตแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลใช้พลังงานมากสุด และขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มใช้พลังงานน้อยสุด เนื่องจากมีการนำของเสีย เช่น ใยปาล์ม มาหมักทำเป็นพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าไปใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ ทำให้สามารถผลิตพลังงานออกมาได้ ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

Chulalongkorn University

- Energy output (without co-product) 40.2 MJ/kgBiodiesel
  Energy input (without co-product) 16.17 MJ/kgBiodiesel
  NEB หรือ NEV (Net Energy Value) 24.03 MJ/kgBiodiesel
  NER 2.48
- Energy output (with co-product) 53.8 MJ/kgBiodiesel
  Energy input (with co-product) 16.17 MJ/kgBiodiesel
  NEB หรือ NEV (Net Energy Value) 37.63 MJ/kgBiodiesel

NER 3.33

(PME 84.4% Glycerin 15.6%)

ถ้าต้องการปรับปรุงให้พลังงานโดยรวมทั้งหมดมีค่าลดลง ต้องเพิ่มศักยภาพและวิธีทางในการผลิตพลังงานออกมา ยกตัวอย่างเช่น นำเศษทะลายปาล์มเปล่า (EFB) ผลิตไฟฟ้าหรือนำไปเป็นวัตถุดิบในการปลูกเห็ด นำเศษเปลือกเนื้อในปาล์มที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งย่อยสลายยาก ไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เป็นต้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Pleanjai & Gheewala พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน

2.8.7 Implications of land use change on the life cycle greenhouse gas emissions from palm biodiedel production in Thailand (Gheewala S.H. และคณะ, 2011)

ทำการประเมินก๊าซเรือนกระจก 3 ตัวหลักได้แก่ CO_2 N_2O และ CH_4 ของการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากการเปลี่ยนพื้นที่ไปปลูกปาล์ม ศึกษา 4 ขั้นตอนคือ การปลูกปาล์ม การขนส่ง การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอ-ดีเซลด้วยวิธี ทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยเน้นไปที่ขั้นตอนการปลูกปาล์มและการขนส่งทะลายปาล์มไปยังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งศึกษา 3 จังหวัดดังนี้ จังหวัดกระบี่ ชลบุรี และปทุมธานี ส่วนขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มและการผลิตไบโอดีเซลเป็นการอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัย มีหน่วยการทำงาน (Functional unit)คือ 1 ล้านลิตรไบโอดีเซลต่อวัน

ผลการวิจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ 1 ล้านลิตรไบโอดีเซลต่อวันดังตารางที่ 2-14 ซึ่งในขั้นตอนการปลูกปาล์มปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากสุดเนื่องจากมีการใช้ปุ๋ย รองลงมาเป็นการผลิตน้ำมันปาล์มเพราะมีน้ำเสียจากการผลิต เมื่อนำไปบำบัดจะก่อให้เกิดก๊าซมีเทน ถ้าไม่นำไปใช้ต่อก็เป็นก๊าซเรือนกระจกปล่อยสู่บรรยากาศได้มาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-14 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตไบโอดีเซล 1 ล้านลิตรต่อวัน

จังหวัด	ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Mg CO_2-eq/day)				
	การปลูกปาล์ม	การขนส่ง	การผลิตน้ำมันปาล์ม	การผลิตไบโอดีเซล	ตลอดวัฏจักร
กระบี่	718	14	207	113	1052
ชลบุรี	581	41	207	113	942
ปทุมธานี	324	106	207	113	750

2.8.8 Environmental sustainability assessment of palm biodiesel production in Thailand (Gheewala S.H. และคณะ, 2012)

ประเมินพลังงานและประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในประเทศไทย ศึกษา 4 ขั้นตอนคือ การปลูกปาล์ม การขนส่ง การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิ-เคชัน (Cradle to Gate) มีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1000 ลิตรไบโอดีเซล

ในขั้นตอนการปลูกปาล์มมีการพิจารณาใช้เครื่องจักรในการปลูก และในขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม น้ำเสียจะถูกบำบัดก่อให้เกิดไบโอแก๊ส ซึ่งนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าสำหรับกระบวนการผลิตภายในโรงงาน ประเมินพลังงานและประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ผลดังต่อไปนี้

- Without co-product NEB 17331 MJ/1000 LBiodiesel
  NER 2.07
- With co-product NEB 53343 MJ/kgBiodiesel
  NER 4.3

  (Biodiesel 92% Glycerin 8%)

ผลกระทบภาวะโลกร้อนของไบโอดีเซลจากปาล์มคือ 1343 kg CO_2-eq/1000 Lbiodiesel ซึ่งขั้นตอนการปลูกปาล์มและการผลิตน้ำมันปาล์มส่งผลกระทบมากที่สุด เนื่องจากมีการใช้ปุ๋ยโดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน และการบำบัดน้ำเสียทำในบ่อเปิด ทำให้เกิดก๊าซมีเทนปล่อยสู่บรรยากาศได้มาก ส่วนผลกระทบอื่นๆ ได้แก่ ผลกระทบการเกิดโอโซน (Photochemical oxidation) 0.26 kg C_2H_4-eq/1000 Lbiodiesel ผลกระทบการเกิดฝนกรด (Acidification) 2.14 kg SO_2-eq/1000 Lbiodiesel ผลกระทบความเป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์ (Human toxicity) 2.67 kg 1,4DB-eq/1000 Lbiodiesel ผลกระทบการเกิดยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) 0.55 kg PO_4^{3}-eq/1000 Lbiodiesel โดยสาเหตุหลักมาจากขั้นตอนการปลูกปาล์ม เนื่องจากมีการใช้ปุ๋ย N-P-K

2.8.9 Greenhouse gas emissions of palm oil mills in Thailand (Musikavong C. และคณะ, 2012)

ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตน้ำมันปาล์ม (Crude Palm Oil, CPO) โดยใช้วิธีการสกัดแบบเปียก (Wet extraction) ศึกษาตั้งแต่การปลูกปาล์มจนถึงการผลิตน้ำมันปาล์ม (Cradle to Gate) โดยพิจารณาก๊าซเรือนกระจกหลัก 3 ตัวคือ CO_2 CH_4 และ N_2O มีหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1 ตันน้ำมันปาล์มดิบ

พิจารณาโดยไม่มีการแบ่งส่วน (without allocation) ได้ผลคือ โรงผลิตน้ำมันปาล์ม (Palm oil mill) มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพไว้เป็นพลังงาน ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 748-1,567 $kgCO_2/t$ CPO (เฉลี่ย 1,039 $kgCO_2/t$ CPO) โรงผลิตน้ำมันปาล์ม (Palm oil mill) ไม่มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพไว้เป็นพลังงาน ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1342-1,619 $kgCO_2/t$ CPO (เฉลี่ย 1,484 $kgCO_2/t$ CPO) ผลเฉลี่ยจากโรงงานทั้งการกักเก็บและไม่กักเก็บก๊าซชีวภาพปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1,198 $kgCO_2/t$ CPO ดังนั้นการกักเก็บก๊าซชีวภาพไว้ใช้จะเป็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึงร้อยละ 30

2.8.10 การวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของปาล์มน้ำมันสำหรับผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย (ลักขณา เจริญสุข และคณะ, 2555)

วิเคราะห์ปริมาณการใช้น้ำของปาล์มน้ำมันสำหรับผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย โดยศึกษาเขตภาคเหนือจำนวน 3 จังหวัด ภาคใต้ 13 จังหวัด รวมทั้งหมด 16 จังหวัด พิจารณาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึง 2554 ซึ่งศึกษาเฉพาะขั้นตอนการปลูกปาล์มน้ำมันเท่านั้น และใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 ในการช่วยคำนวณ ได้กำหนดให้ใช้น้ำจากชลประทาน และอัตราการชะล้างปุ๋ยอ้างอิงจากต่างประเทศ

ผลจากการวิจัยพบว่า ปริมาณน้ำในการปลูกปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซลโดยเฉลี่ยมีค่า 2,139 m^3/ton of Palm ซึ่งทั้งภาคเหนือและภาคใต้มีปริมาณการใช้น้ำ Green > Gray > Blue Water Footprint เพราะใช้น้ำส่วนใหญ่จากน้ำฝน โดยเป็นข้อดีเนื่องจากน้ำฝนไม่มีต้นทุน ดังนั้นฝนเป็นปัจจัยสำคัญในการปลูกปาล์ม แต่ก็ต้องมีการพึ่งพาระบบชลประทานเพื่อให้มีน้ำใช้ได้อย่างเพียงพอ เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้น้ำระหว่างภาคเหนือและใต้พบว่า ภาคเหนือมีการใช้น้ำมากกว่าภาคใต้ถึง 3.9 เท่า โดยจังหวัดที่ใช้น้ำมากสุดคือ พิษณุโลกใช้ 6093 m^3/ton จังหวัดที่ใช้น้ำน้อยสุดคือ สุราษฎร์ธานีใช้ 1,070 m^3/ton เนื่องจากแต่ละภาคมีลักษณะภูมิประเทศต่างกัน สภาพแวดล้อมต่างกัน จึงมีความต้องการใช้น้ำต่างกัน อีกทั้งภาคเหนือให้ปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่ต่ำกว่า

แนวทางแก้ไขสำหรับการใช้น้ำในภาคเหนือให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถทำได้โดยมีการจัดการช่วงเวลาเพาะปลูก การปรับปรุงพันธุ์ให้เหมาะกับพื้นที่ และการลดใช้ปุ๋ยเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 2-15

ตารางที่ 2-15 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่	งานวิจัย	หน่วยหน้าที่	ขอบเขต	การวิจัย
1	A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel (Harding K.G. และคณะ, 2007)	1 ton Biodiesel	Cradle to Gate	ศึกษาผลกระทบเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ และการนำแอลกอฮอล์กลับมาใช้ใหม่ที่ต่างกัน
2	Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel (Pacca S. และคณะ, 2010)	1 ha	Cradle to Gate	ศึกษาก๊าซเรือนกระจกและพลังงาน
3	Life cycle analysis of biodiesel production (Martins F. และคณะ, 2011)	-	Cradle to Gate	ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของน้ำมันพืช แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน
4	Environmental Evaluation of Biodiesel Production from Palm Oil in a Life Cycle Perspective (Gheewala S.H. และคณะ, 2007)	1 ton Biodiesel	Cradle to Gate	ทำบัญชีรายการสารเข้า สารออก ของการผลิตไบโอดีเซล
5	Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand (Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	1 ha	Cradle to Gate	ศึกษาพลังงาน
6	Life cycle energy efficiency and potentials of biodiesel production from palm oil in Thailand (Malakul P. และคณะ , 2010)	1 kg Biodiesel	Cradle to Gate	ศึกษาพลังงาน
7	Implications of land use change on the life cycle greenhouse gas emissions from palm biodiedel production in Thailand (Gheewala S.H. และคณะ, 2011)	1 ML Biodiesel	Cradle to Gate	ศึกษาก๊าซเรือนกระจก
8	Environmental sustainability assessment of palm biodiesel production in Thailand (Gheewala S.H. และคณะ, 2012)	1000 L Biodiesel	Cradle to Gate	ศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ภาวะโลกร้อน การเกิดฝนกรด เป็นต้น
9	Greenhouse gas emissions of palm oil mills in Thailand (Musikavong C. และคณะ, 2012)	1 t CPO	Cradle to Palm oil mill Gate	ศึกษาก๊าซเรือนกระจก

ที่	งานวิจัย	หน่วยหน้าที่	ขอบเขต	การวิจัย
10	Water Footprint Analysis of Oil Palm for Biodiesel Production in Thailand (ลักขณา เจริญสุข และคณะ, 2555)	ton FFB	Only for cultivating	ศึกษาการใช้น้ำ (Water footprint)
11	งานวิจัยนี้	1 L Biodiesel	Cradle to Gate	ศึกษาก๊าซเรือนกระจก พลังงาน และการใช้น้ำ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมามักแบ่งส่วนการศึกษาเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้คือ 1) ขั้นตอนการปลูกปาล์ม 2) ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์ม 3) ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล 4) การขนส่ง โดยมักศึกษาผลกระทบในด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและด้านพลังงาน ซึ่งขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันถือว่าเป็นส่วนของภาคอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วยหลายกระบวนการในการผลิต จึงมีการใช้พลังงานมาก และมีแนวโน้มปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล (Cradle to Gate) ตั้งแต่การปลูกปาล์มจนถึงโรงงานผลิตไบโอดีเซล โดยเฉพาะในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล เน้นการศึกษารายละเอียดย่อยลงไปในแต่ละกระบวนการ ทั้งในด้านพลังงาน การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และปริมาณน้ำที่ใช้ แล้วทำการเปรียบเทียบในแต่ละกระบวนการผลิตย่อยและเปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตที่ต่างกัน ได้แก่ โรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร ที่ใช้วิธีการกลั่น กับโรงงานบางจากไบโอฟูเอล บางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ อีกทั้งการศึกษาปริมาณการใช้น้ำของการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยนั้น ยังไม่ครอบคลุมถึงขั้นตอนโรงงานผลิตไบโอดีเซล มีเพียงการศึกษาในการขั้นตอนการปลูกปาล์มน้ำมันเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์-ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกปาล์ม การสกัดน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง รวมถึงศึกษาลงรายละเอียดในแต่ละกระบวนการย่อยในโรงงานผลิตไบโอดีเซล ซึ่งได้แก่กระบวนการเกิดปฏิกิริยา การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ และการทำแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์ งานวิจัยนี้จะทำการเก็บข้อมูลโดยตรงเช่น การสอบถามข้อมูล การสัมภาษณ์ รวมถึงการตรวจวัด ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลปฐมภูมิ จากโรงงานผลิตไบโอดีเซลจำนวน 2 โรงงานคือ โรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร และโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยทั้ง 2 โรงงานมีกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีที่ต่างกันคือ โรงงานวีระสุวรรณใช้วิธีการกลั่น (Dry purification) ส่วนโรงงานบางจากไบโอฟูเอลใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ (Wet purification) ทำให้งานวิจัยนี้สามารถประเมินภาพรวม และกระบวนการย่อยในโรงงานผลิตไบโอดีเซลที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ อีกทั้งสามารถใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลที่ต่างกัน ดังนั้นการนำการประเมินวัฏจักรชีวิตมาใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจึงสามารถใช้เป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการวางแผน พัฒนา ออกแบบให้การผลิตไบโอดีเซลเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

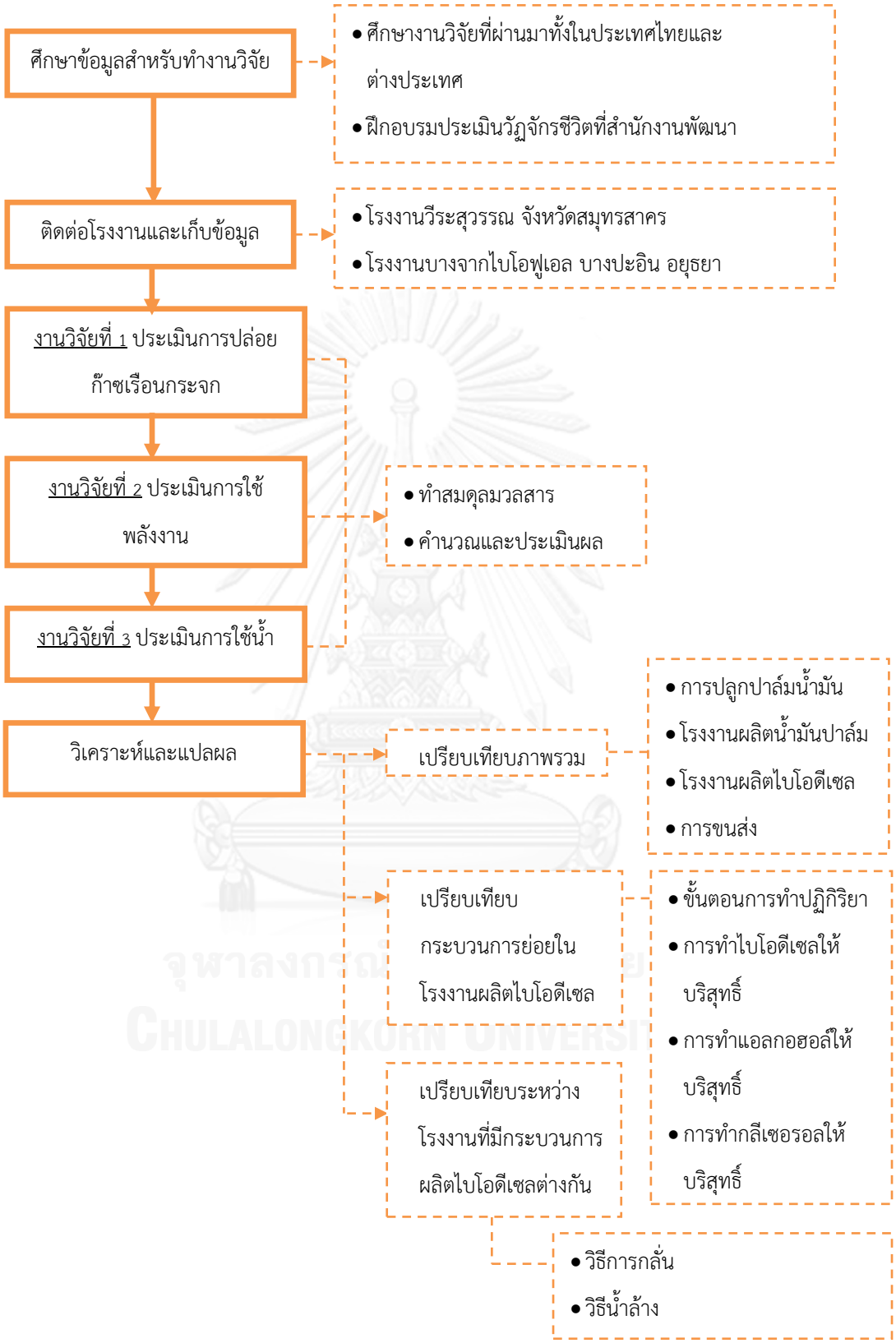
การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยนี้ทำการประเมินผลกระทบขั้นกลาง (Mid-point impact) คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ ซึ่งไม่ได้ทำการประเมินผลกระทบขั้นปลาย (End-point impact) เพราะผลกระทบขั้นปลายเป็นผลต่อเนื่องจากผลกระทบขั้นกลางที่แสดงถึงความเสียหายต่อมนุษย์ ต่อระบบนิเวศ เป็นต้น ซึ่งต้องคำนึงการสิ่งแวดล้อมภายรอบโรงงาน รวมถึงบุคคลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลในตลอดวัฏจักร จึงทำให้เป็นการยากที่จะเก็บรวบรวมข้อมูลได้ โดยได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 แผนงานหลักคือ

1. ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($kgCO_2eq/L$ biodiesel) เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน โดยพิจารณาก๊าซเรือนกระจก 3 ชนิดดังนี้ CO_2 N_2O และ CH_4
2. ประเมินพลังงาน (MJ/L biodiesel) ทั้งในด้านการใช้พลังงาน และพลังงานที่จะได้จากผลิตภัณฑ์ แหล่งพลังงานหลักที่ใช้มาจากไฟฟ้า น้ำมันเตา และน้ำมันดีเซล แล้ววิเคราะห์ออกมาเป็นค่า NEV (Net Energy Value) และค่า NER (Net Energy Ratio)

3. ประเมินการใช้น้ำ (m^3/L biodiesel) พิจารณาถึงปริมาณน้ำใช้และปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยออกมา โดยการทำสมดุลมวลน้ำ (Water Balance)

การศึกษาเริ่มจากการทำสมดุลมวลสาร เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณ แล้วทำการประเมินทั้ง 3 แผนงาน แล้วเปรียบเทียบผลกระทบในภาพรวม ในกระบวนการย่อย และเปรียบเทียบระหว่างโรงงาน ทำให้เปรียบเทียบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลดการใช้ทรัพยากรได้เหมาะสมมากขึ้น โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 3-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เป้าหมายและขอบเขต

1.) ผลิตภัณฑ์ : ไบโอดีเซล

2.) หน้าที่ผลิตภัณฑ์ : ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอุตสาหกรรมอื่นต่อไป

3.) หน่วยอ้างอิง (Functional Unit, FU) : ไบโอดีเซลปริมาณ 1 ลิตรของที่ผลิตได้

4.) เป้าหมายหลัก : เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหน่วยของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ ที่เกิดขึ้นของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ภายใต้หน่วยอ้างอิงเดียวกันคือ 1 ลิตรไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เพื่อจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา ปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไปในอนาคต โดยเปรียบเทียบดังนี้

- เปรียบเทียบภาพรวม 4 ขั้นตอนได้แก่ การปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง
- เปรียบเทียบกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตไบโอดีเซล 4 กระบวนการได้แก่ การทำปฏิกิริยา การทำเอสเตอร์หรือไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ และการทำแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์
- เปรียบเทียบระหว่าง 2 โรงงานที่ใช้วิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีที่ต่างกันคือ โรงงานวีระสุวรรณใช้วิธีการกลั่น ส่วนโรงงานบางจากไบโอฟูเอลใช้วิธีน้ำล้าง

5.) ขอบเขต : ใช้หลักการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (LCA) ในการประเมินผล ตั้งแต่การปลูกปาล์มน้ำมัน การขนส่งวัตถุดิบเข้ามายังโรงงาน ผ่านกระบวนการผลิตต่างๆ จนได้ไบโอดีเซล (Cradle to Gate) ซึ่งไบโอดีเซลที่ผลิตได้ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์กลางทางเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของภาคขนส่งและภาคอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป โดยทำการศึกษากรณีตัวอย่างจาก 2 โรงงานได้แก่ โรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร และโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

3.3 บัญชีข้อมูล

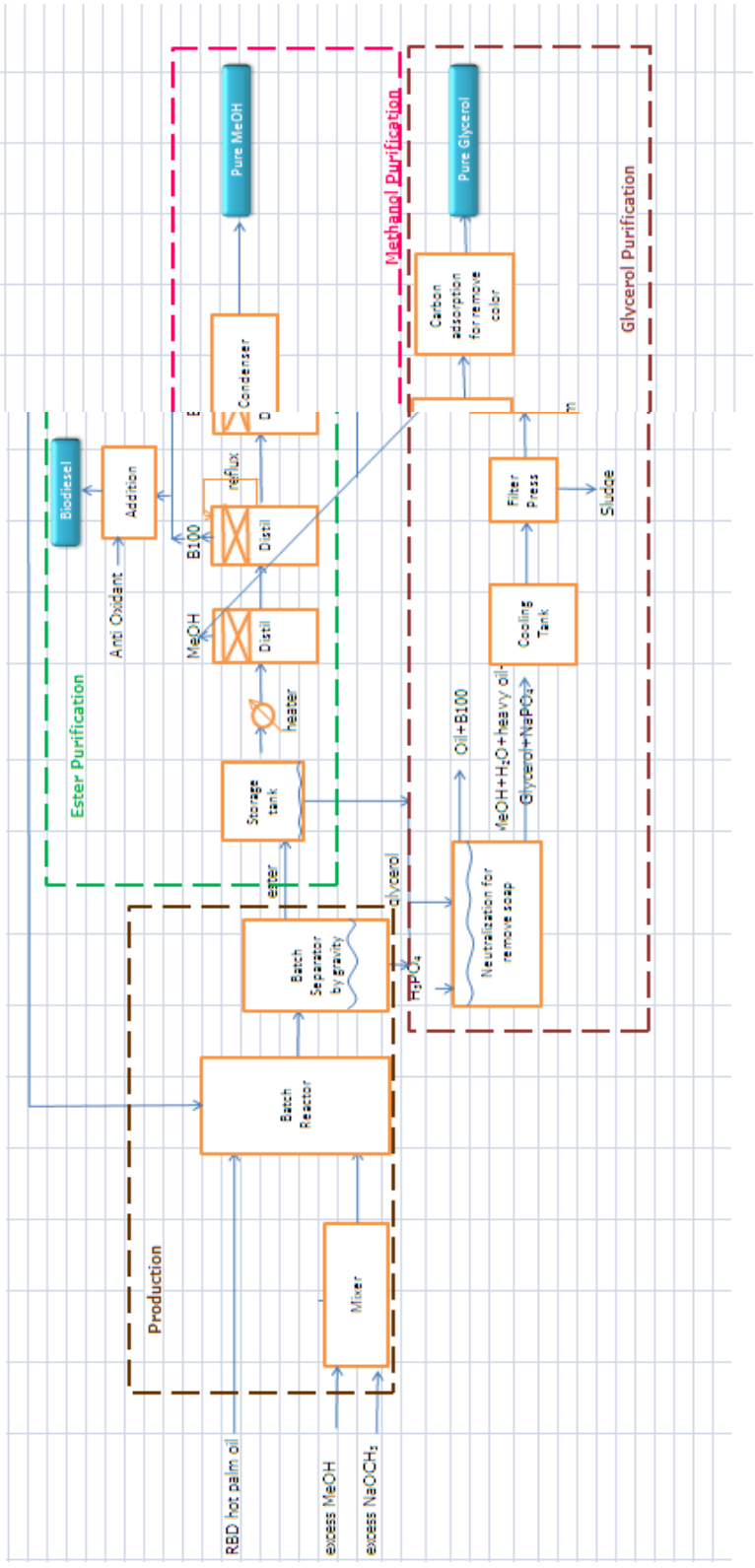
การทำบัญชีข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักดังภาพที่ 3-2 คือ ส่วนของการปลูกปาล์ม โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม การขนส่ง จะอ้างอิงจากข้อมูลทุติยภูมิ เช่น จากงานวิจัย วิทยานิพนธ์ กรณีศึกษาต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจะอ้างอิงข้อมูลภายในประเทศเป็นหลัก สำหรับอีกส่วนคือ โรงงานผลิตไบโอดีเซล จะใช้ข้อมูลปฐมภูมิ เช่น ข้อมูลจากการสอบถาม การสัมภาษณ์ การตรวจวัด เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องศึกษาอย่างละเอียด

1) โรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร ข้อมูลโดยทั่วไปเกี่ยวกับโรงงานดังตารางที่ 3-1 เป็นโรงงานผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (B100) ภายในโรงงานพบว่าแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการหลักดังนี้ กระบวนการผลิต (Production) กระบวนการทำเอสเตอร์หรือไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Ester Purification) กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ (Glycerol Purification) และกระบวนการทำแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์ (Methanol Purification) ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ตลอดจนกลายเป็นไบโอดีเซลดังภาพที่ 3-2 ข้อมูลสำคัญที่ต้องการเก็บรวบรวมแบ่งออกเป็น 6 หลักดังนี้คือ สมดุลมวลสาร ระบบน้ำมันเตา ระบบน้ำหล่อเย็น การขนส่งวัตถุดิบ การใช้น้ำ และการใช้ไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลสำหรับทำสมดุลมวลสารดังภาพที่ 3-3 และตารางที่ 3-2 โดยถือว่าข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลปฐมภูมิทั้งหมด เนื่องจากได้ข้อมูลจากการรวบรวม เก็บข้อมูลด้วยตนเอง หรือได้จากการสอบถาม ส่วนขั้นตอนการปลูกปาล์มและการผลิตน้ำมันปาล์มจะใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากงานวิจัยในประเทศ เป็นข้อมูลในการทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม

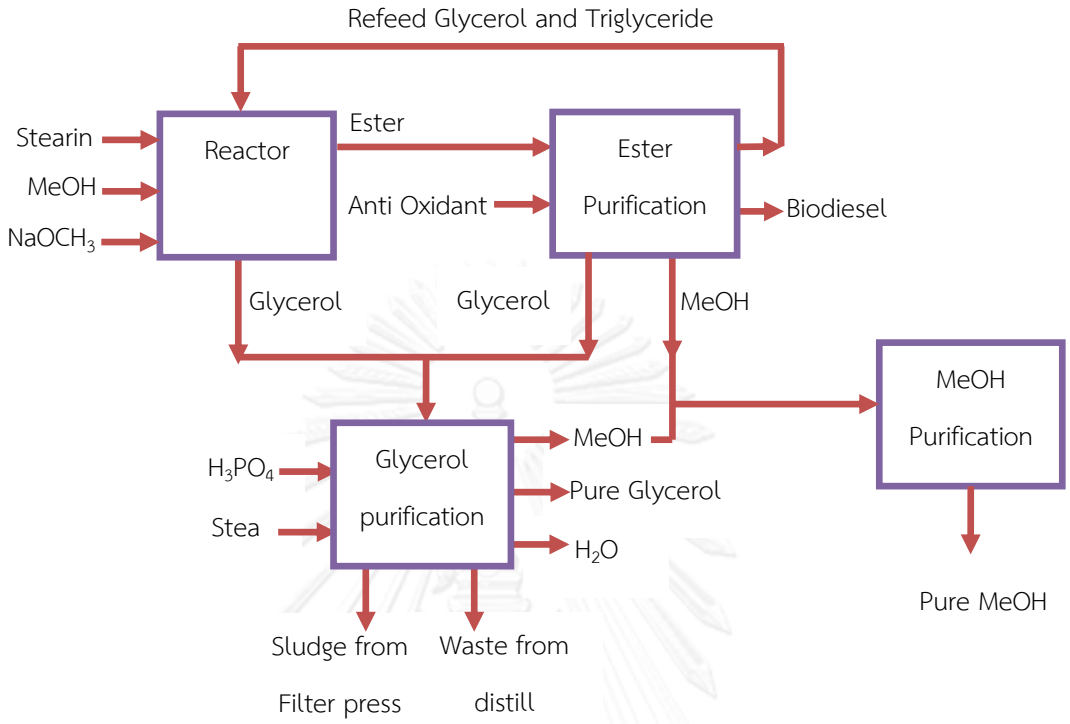
ตารางที่ 3-1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร

บริษัท	บจ. วีระสุวรรณ
กำลังผลิต (ลิตร/วัน)	200,000
วัตถุดิบที่ใช้	Palm Stearine RBDPO
สถานที่ตั้งโรงงาน	53/6 หมู่ 5 ถ. เศรษฐกิจ ต. นาดี อ. เมือง จ. สมุทรสาคร 74000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3-2 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทางกายภาพ



ภาพที่ 3-3 แผนผังข้อมูลสำหรับการเก็บข้อมูลโรงงานวีระสุวรรณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-2 บัญชีข้อมูลโรงงานวีระสุวรรณ

Process	Information		unit	Source
	in	out		
Mass Balance or Material Balance				
Production (Reactor)	Palm Stearin		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
	MeOH		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
	$NaOCH_3$		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
	Refeed			สอบถาม/ ตรวจวัด เก็บข้อมูล
		Impure Ester	L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
		Impure Glycerol	L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
Ester Purification	Impure Ester		L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
	Anti oxidant		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Impure Glycerol	L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
		Impure MeOH	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Refeed	L/d	สอบถาม/ ตรวจวัด เก็บข้อมูล
		Biodiesel	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
Glycerol Purification	Impure Glycerol from reactor		L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
	Impure Glycerol from Ester Purification		L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
	H_3PO_4		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
	Activated carbon		Kg/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Impure MeOH	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Pure Glycerol	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		H_2O (vapor)	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Waste Carbon	Kg/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Waste from distillation	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Sludge from filter press	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Process	Information		unit	Source
	in	out		
MeOH Purification	Impure MeOH from ester purification		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
	Impure MeOH from glycerol purification		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
	Impure MeOH from other		L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		Pure MeOH	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
		B100	L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
น้ำมันเตา				
Production (Reactor)			L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
Ester Purification			L/d	ตรวจวัดเก็บข้อมูล
Glycerol Purification			L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์
MeOH Purification			L/d	สอบถาม/ สัมภาษณ์

2) โรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ข้อมูลโดยทั่วไปเกี่ยวกับโรงงานดังตารางที่ 3-3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

บริษัท	บางจากไบโอฟูเอล
กำลังผลิต (ลิตร/วัน)	300,000
วัตถุดิบที่ใช้	CPO, Palm stearine
สถานที่ตั้งโรงงาน	28 หมู่ 9 ต.บางกระสั้น อ. บางปะอิน จ. พระนครศรีอยุธยา 13160

3.4 ประเมินผล

วิเคราะห์ข้อมูลจากการเก็บข้อมูลทั้งหมด โดยไม่มีการนำขั้นตอนการก่อสร้างโรงงานต่างๆ และแรงงานที่ใช้ มาทำการวิเคราะห์ด้วย โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ช่วยในการประเมินผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน (Global warming) ในด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และประเมินการใช้ทรัพยากรในด้านการใช้พลังงาน (Energy depletion หรือ Energy Balance) การใช้น้ำ (Water Balance) โดยอ้างอิงวิธีคำนวณจากการประเมินปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอน (Carbon Footprint) ดังสมการ

$$\text{GHG emission} = \text{Activity} \times \text{Emission Factor}$$

$$\text{Energy consumption} = \text{Activity} \times \text{Energy Factor}$$

$$\text{Water consumption} = \text{Activity} \times \text{Water Factor}$$

ค่าแฟคเตอร์มีหน่วยต่างกันไปในแต่ละการประเมินผลกระทบหรือ การใช้ทรัพยากร สำหรับแหล่งที่มาของค่าแฟคเตอร์ในงานวิจัยนี้ได้จากทั้งข้อมูลภายในประเทศและต่างประเทศ ภายในประเทศเช่น องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก (TGO) MTEC งานวิจัยต่างๆ เป็นต้น ส่วนข้อมูลต่างประเทศเช่น IPCC ฐานข้อมูลในซอฟแวร์ เป็นต้น

3.5 แปลผล

นำผลที่ได้จากการประเมินมาทำการวิเคราะห์หากระบวนการย่อยที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด และกระบวนการย่อยที่ส่งผลต่อการใช้ทรัพยากรได้แก่ การใช้พลังงาน การใช้น้ำ จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาโรงงานที่ส่งผลกระทบน้อยที่สุด พร้อมกับเหตุผลประกอบ เพื่อใช้เป็นแนวทางปรับปรุงในการลดการใช้พลังงาน การใช้น้ำ และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอบเขตการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักคือ การปลูกปาล์ม (Oil palm cultivation) การผลิตน้ำมันปาล์ม (Palm oil mill) การผลิตไบโอดีเซล (Transesterification Process) และการขนส่ง (Transportation) ซึ่งขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มนั้นประกอบด้วยการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) และการผลิตปาล์มสเตียรีน (Palm stearin) ทั้งนี้การเก็บข้อมูลการขนส่งประกอบด้วยการขนส่งทะลายปาล์มจากพื้นที่ปลูกปาล์มไปยังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่งปาล์มสเตียรีนมายังโรงงานผลิตไบโอดีเซล โดยมี 1 ลิตรไบโอดีเซลเป็นหน่วยผลิตภัณฑ์ (Functional unit, FU) การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูล หรือการทำบัญชีข้อมูลมวลสาร (Life cycle inventory, LCI) เพื่อจัดทำสมดุลมวลสาร จากนั้นจึงทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นกลาง (Mid-point impact) ในการศึกษาทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหน่วยของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($kgCO_2$ eq/L B100) ปริมาณการใช้พลังงาน (MJ/L B100) และปริมาณการใช้น้ำ (m^3/L B100)

4.1 บัญชีข้อมูล

บัญชีข้อมูล (Inventory data) ในการศึกษาจะแบ่งที่มาของการรวบรวมข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการเก็บข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) จากโรงงานผลิตไบโอดีเซลได้แก่ โรงงานวีระสุวรรณ และโรงงานบางจากไบโอฟูเอล โดยทำการสอบถาม สัมภาษณ์โรงงานโดยตรง อีกส่วนทำการเก็บข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) สำหรับขั้นตอนการปลูกปาล์ม และการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ ภายในประเทศ

4.1.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process)

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลแบบแห้ง (Dry process) คือ เทคโนโลยีซึ่งใช้น้ำน้อยมากในกระบวนการผลิต และไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย จึงไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียภายในโรงงานการผลิต กระบวนการผลิตไบโอดีเซลใช้วิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการผลิตภายในโรงงานแสดงดังภาพที่ 4-1 เป็นระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) คือมีทั้งระบบแบบไม่ต่อเนื่องหรือทีละเท (Batch system) และแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ และการทำแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์ โดยสามารถสรุปสารเข้าและสารออกในแต่ละกระบวนการได้ดังภาพที่ 4-2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification process) ของโรงงานเป็นระบบแบบไม่ต่อเนื่องหรือทีละเท (Batch system) มีวัตถุดิบหลักคือ ปาล์มสเตียรีน (ไขปาล์ม) เมทานอล (แอลกอฮอล์) โซเดียมเมทิลเลต หรือโซเดียมเมท็อกไซด์ ($NaOCH_3$) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และของเสียที่นำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัตถุดิบจากการกลั่นไบโอดีเซล (Refeed distillation waste) เนื่องจากของเสียนั้นประกอบด้วยสารไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ดังนั้นจึงสามารถนำกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่อีกครั้ง โดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันเริ่มจากการผสมเมทานอลกับโซเดียมเมทิลเลตก่อน แล้วจึงนำไปผสมกับปาล์มสเตียรีนและของเสียจากการกลั่นไบโอดีเซล เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ทั่วถึง และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 ถึง 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงครึ่งถึงสองชั่วโมง จากนั้นจะนำเข้าสู่ถังแยกส่วน โดยตั้งทิ้งไว้ประมาณ 5 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างเอสเตอร์กับกลีเซอรอล เนื่องจากความหนาแน่นของสารทั้งสองตัวมีความแตกต่างกัน โดยเอสเตอร์มีความหนาแน่น 0.84 กิโลกรัมต่อลิตร กลีเซอรอล 1.00 กิโลกรัมต่อลิตร จึงทำให้เอสเตอร์ลอยอยู่ชั้นบน และกลีเซอรอลลอยู่ชั้นล่าง ซึ่งจะมีการเก็บตัวอย่างมาสังเกตการแยกชั้น เนื่องจากถ้ามีปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชัน (Sponification) หรือการเกิดสบู่เกิดขึ้น จะทำให้เอสเตอร์และกลีเซอรอลแยกออกจากกันได้ยาก เมื่อแยกเอสเตอร์ออกมาจะนำเข้าสู่ถังกักเก็บเพื่อรอเข้าสู่กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ต่อไป ซึ่งมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันได้ ดังนั้นจึงมีกลีเซอรอลเกิดขึ้นและตกแยกชั้นอยู่บริเวณด้านล่างถัง ต้องมีการนำกลีเซอรอลออกจากถังกักเก็บเช่นกัน โดยกลีเซอรอลจากทั้ง 2 ถังนี้จะรวบรวมไปยังถังกักเก็บกลีเซอรอลก่อนเข้าสู่กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ต่อไป

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification) เป็นระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) โดยใช้วิธีการกลั่น ซึ่งมีทั้งหมด 3 หอกลั่น เอสเตอร์จากถังกักเก็บจะถูกนำเข้าหอกลั่นที่ 1 เพื่อทำการแยกเมทานอลที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา แล้วเข้าสู่หอกลั่นที่ 2 และ 3 เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งหอกลั่นที่ 3 จะมีของเสียเกิดขึ้น ของเสียจะส่งไปยังถังกักเก็บเพื่อรอนำเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาอีกครั้ง ส่วนไบโอ-ดีเซลที่ได้นั้นจะนำไปเติมสารเคมี (Anti-oxidant) คือ เคโรบิท (Kerobit) เพื่อให้ไบโอดีเซลมีสีเหลืองสวยงาม และเพื่อรักษาค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability) ให้ผ่านมาตรฐานตามที่กำหนดในประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2552 ซึ่งระบุว่าต้องมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมง เนื่องจากหากไม่มีการเติมสารเคมี เมื่อปล่อยทิ้งไว้จะเกิดสภาพความเป็นกรด เป็นผลให้ไบโอดีเซลสลายตัวได้เมื่อสัมผัสกับอากาศ ดังนั้นจะได้ไบโอดีเซล (B100) ที่มีคุณภาพผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานเข้าสู่ถังกักเก็บเพื่อรอจำหน่าย โดยมีค่าความหนาแน่น 0.87 กิโลกรัมต่อลิตร

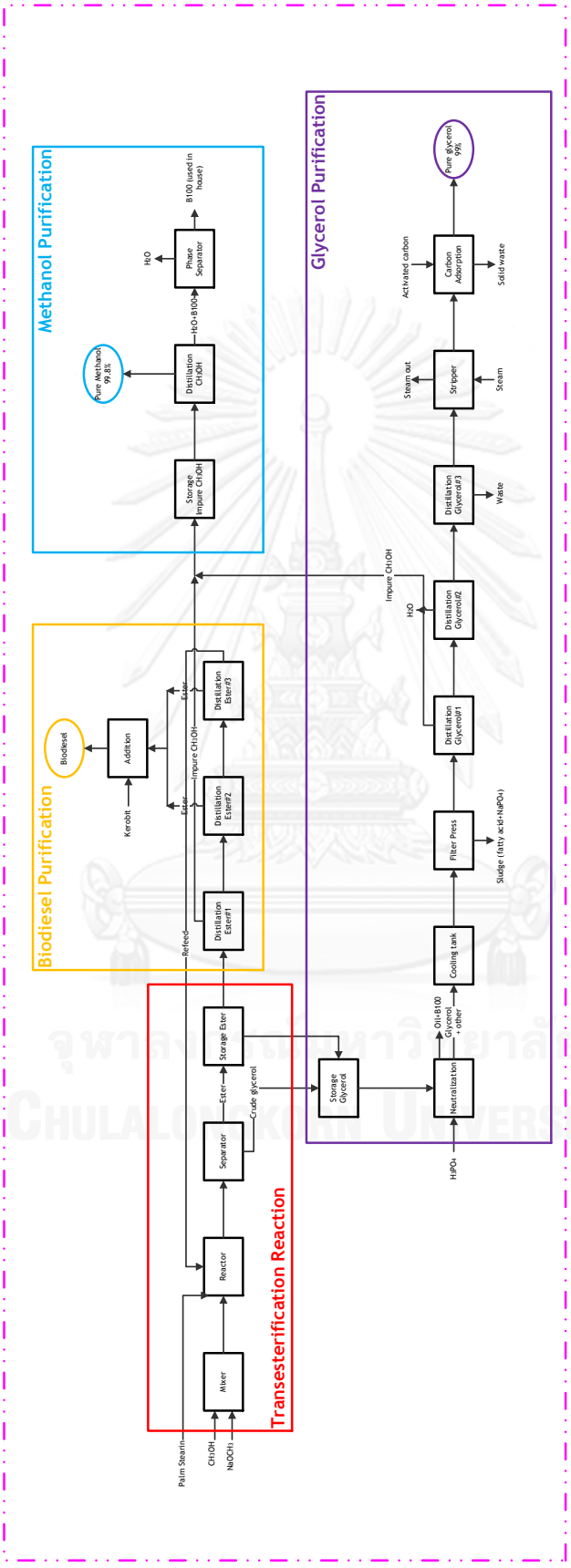
กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ (Glycerol purification) เป็นระบบทั้งแบบไม่ต่อเนื่องหรือทีละเท (Batch system) และแบบต่อเนื่อง (Continuous system) โดยกลีเซอรอลเป็นสารที่มีความหนืดสูงมาก มีลักษณะเหนียว เพราะฉะนั้นต้องใช้ความร้อน เพื่ออุ่นกลีเซอรอลให้มีความหนืดลดลง ทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา และการเคลื่อนย้ายกลีเซอรอลในแต่ละขั้นตอน โดยส่วนแรกของการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์นั้นเป็นระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch system) คือ นำกลีเซอรอลจากถังกักเก็บเข้าสู่ขั้นตอนการปรับสภาพ (Neutralization) เพื่อกำจัดสบู่ให้กลายเป็นกรดไขมัน โดยเติมกรดฟอสฟอริก เมื่อปล่อยทิ้งไว้จะเกิดการแยกชั้น ซึ่งชั้นบนเป็นน้ำมันที่มีเกลือสูง สามารถนำไปขายผลิตเป็นน้ำมันเตาได้ ส่วนชั้นล่างประกอบไปด้วยกลีเซอรอล น้ำมันหนัก (Heavy oil) น้ำ เมทานอล และอื่นๆ จะนำไปทำความเย็น (Cooling tank) เข้าสู่ขั้นตอนการบีบอัด (Filter press) เพื่ออัดน้ำกลีเซอรอล และเมทานอล แยกออกจากเศษตะกอน ตะกอนที่ได้นั้นเป็นส่วนประกอบของกรดไขมันและโซเดียมฟอสเฟต ซึ่งสามารถนำไปขายได้ ส่วนน้ำ กลีเซอรอล และเมทานอล จะถูกส่งไปยังถังกักเก็บ จากนั้นจะเข้าสู่ระบบซึ่งเป็นขั้นตอนแบบต่อเนื่อง (Continuous system) คือ ขั้นตอนการกลั่นโดยมีหอกลั่นทั้งหมด 3 หอ หอกลั่นที่ 1 จะเป็นการแยกเมทานอล หอกลั่นที่ 2 เป็นการแยกน้ำให้ระเหยเป็นไอ หอกลั่นที่ 3 จะได้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น และของเสียจากหอกลั่นที่ 3 นี้จะนำไปขายเพื่อทำเชื้อเพลิงทดแทน กลีเซอรอลที่ได้จากการกลั่นนั้นยังคงมีกลิ่นและมีสีเหลือง จึงเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดกลิ่น (Stripper) โดยใช้ไอน้ำ นอกจากสามารถกำจัดกลิ่นแล้ว ยังสามารถกำจัดสิ่งสกปรกได้ แต่ทำให้มีกลีเซอรอลหลุดออกไปบางส่วนเช่นกัน จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการดูดซับสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ทำให้ได้กลีเซอรอลที่ใส ไม่มีกลิ่น ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99 ซึ่งจะนำไปขายต่อ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว (Solid waste) จะส่งต่อให้แก่บริษัทอื่น เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้

กระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (Methanol purification) ทำการรวบรวมเมทานอลจากหอกลั่นที่ 1 ของกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ และจากหอกลั่นที่ 1 ของกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ไว้ในถังกักเก็บ แล้วนำเข้าสู่ระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) คือหอกลั่นจำนวน 1 หอ เมื่อควบแน่น (Condenser) แล้วจะได้เมทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยมีความหนาแน่น 0.792 กิโลกรัมต่อลิตร ซึ่งมีการตรวจสอบคุณภาพโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) วัดค่าความหนาแน่น เพราะหากเมทานอลมีปริมาณน้ำปะปนออกมา ค่าความหนาแน่นที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าค่าปกติ ส่วนของเสียที่เกิดจากการกลั่น ประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 60 และไบโอดีเซลประมาณร้อยละ 40 โดยจะนำเข้าขั้นตอนการแยก (Phase separation) ด้วยวิธีการต้ม เพื่อกำจัดน้ำออก ทำให้ได้ไบโอดีเซล ซึ่งทางโรงงานจัดเป็นสวัสดิการให้แก่พนักงานให้นำไปใช้ได้ ทั้งนี้ของเสียจากการกลั่นมีปริมาณน้อย ทางโรงงานจึงเก็บรวบรวมให้ได้ปริมาณมากก่อนจะทำการต้มแยกน้ำ

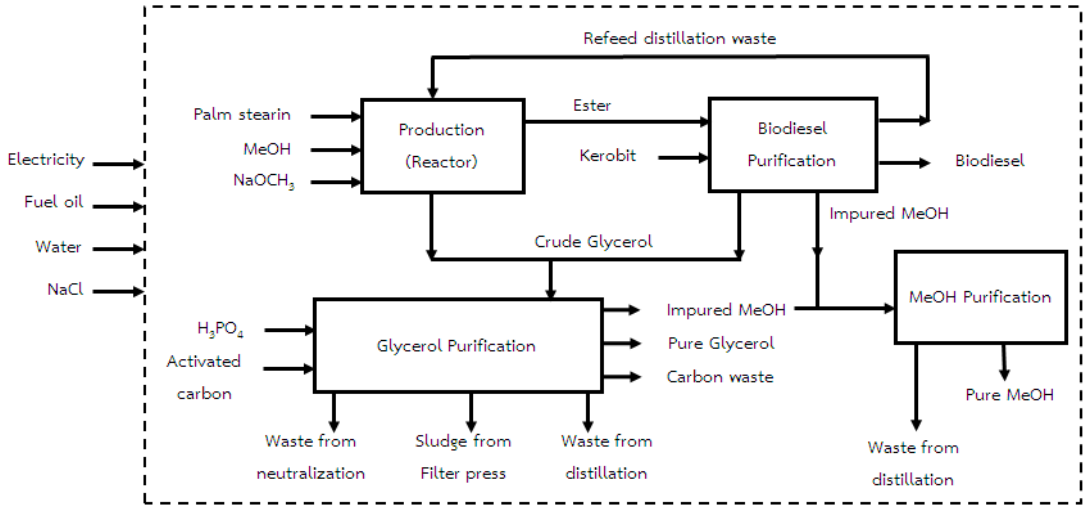
โรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร มีกำลังผลิตสูงสุด 200,000 ลิตรต่อวัน กำลังผลิตโดยเฉลี่ยประมาณ 85,000 ลิตรต่อวัน ซึ่งเดินเครื่องผลิต 240 วันต่อปี ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตทั้งหมดมีการจัดการ และนำไปใช้ประโยชน์ต่อ แสดงดังตารางที่ 4-1 เพื่อไม่ให้เกิดการทิ้งของเสียดังกล่าวสู่สิ่งแวดล้อม (Zero waste) การเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดเป็นการเก็บข้อมูลจากภาคสนามโดยการสอบถาม สัมภาษณ์ หน่วยการผลิตต่างๆ ของโรงงาน ซึ่งข้อมูลสมดุลมวลสารของวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 4-2 ในหน่วยมวล นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ไฟฟ้า น้ำมันเตา น้ำ และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

พลังงานไฟฟ้ามีแหล่งที่มาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งทำการเก็บข้อมูลอ้างอิงจากเครื่องจักรที่ใช้ (Full capacity) ในแต่ละกระบวนการผลิต โดยใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการผสมสาร การกลั่น การควบแน่น เป็นต้น ดังตารางที่ 4-3 กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ใช้ไฟฟ้ามากถึงร้อยละ 43.68 เนื่องจากในกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์นั้นประกอบด้วยหลายขั้นตอน หลายหอกลั่น รองลงมาคือกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (ร้อยละ 34.48) กระบวนการทำปฏิกิริยา (ร้อยละ 14.94) และกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (ร้อยละ 6.90) น้ำมันเตาเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในการเผาให้ความร้อนในหอกลั่น ใช้เผาต้มน้ำเพื่อทำไอน้ำใช้ในการอุ่นกลีเซอรอล และใช้เป็นตัวกลางส่งผ่านความร้อนในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีปริมาณการใช้น้ำมันเตาแสดงดังตารางที่ 4-4

น้ำที่ใช้ในการผลิตนั้นเป็นน้ำประปา ซึ่งทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำมาใช้ โดยใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เพื่อกำจัดไอออนบางชนิด (Deminerization) ให้มีคุณภาพน้ำที่เหมาะสำหรับทำน้ำหล่อเย็น (Cooling water) ไว้ใช้หลังจากการกลั่น สำหรับการรีเจนเนอร์เรชัน (Regeneration) ถังแลกเปลี่ยนไอออน จะใช้โซเดียมคลอไรด์ในการรีเจนเนอร์เรชันปริมาณ 400 ลิตรต่อวัน นอกจากการทำน้ำหล่อเย็นแล้ว น้ำประปายังถูกใช้เป็นน้ำทำความเย็นสำหรับกลีเซอรอลก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการบีบอัด และใช้ผลิตไอน้ำในขั้นตอนกำจัดกลิ่นของกลีเซอรอล (Stripper) โดยปริมาณการใช้น้ำ และปริมาณการใช้โซเดียมคลอไรด์ซึ่งอ้างอิงกับข้อมูลการใช้น้ำหล่อเย็นหลังจากการกลั่นแสดงดังตารางที่ 4-5 และ 4-6 ตามลำดับ ข้อมูลของการขนส่งวัตถุดิบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-7 ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง



ภาพที่ 4-1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process)



ภาพที่ 4-2 มวลสารเข้าและสารออกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process)

ตารางที่ 4-1 ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process)

กระบวนการ	**ของเสียจากขั้นตอน**	**ของเสีย**	**การนำไปใช้**
การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์	การกลั่น	ของเหลวที่เหลือ	นำกลับเข้าสู่กระบวนการเกิดปฏิกิริยาใหม่
การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์	การปรับสภาพ	ของเหลว (เศษเกลือและน้ำมัน)	ขาย เพื่อผลิตน้ำมันเตา
	การบีบอัด	กากตะกอน	ขาย
	การกลั่น	ของเหลวที่เหลือ	ขาย เพื่อทำเชื้อเพลิงทดแทน
	การดูดซับสี	ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว	ส่งต่อให้บริษัทอื่น เพื่อเป็นเชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้
การทำเมทานอลให้บริสุทธิ์	การกลั่น	ของเหลวที่เหลือ	บำบัดเป็นไบโอดีเซลใช้ภายในโรงงาน

ตารางที่ 4-2 ปริมาณสารเข้าและสารออกในแต่ละกระบวนการผลิต

กระบวนการ	ขั้นตอนย่อย	สารเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารออก	ปริมาณ	หน่วย
Reaction Process	Mixer	CH_3OH	15836	kg/d	CH_3OH+ $NaOCH_3$	16336	kg/d
		$NaOCH_3$	500	kg/d			
	Reactor	CH_3OH+$NaOCH_3$	16336	kg/d	Gly+Ester	96286	kg/d
		Palm stearin	73425	kg/d			
		refeed	6525	kg/d			
	Separator & Storage	Gly+Ester	96286	kg/d	Ester	86286	kg/d
					Glycerol	10000	kg/d
Biodiesel Purification	Distill#1	Ester	86286	kg/d	impure MeOH	5922	kg/d
					other	80364	kg/d
	Distill#2	other	80364	kg/d	B100	59070	kg/d
					other	21294	kg/d
	Distill#3	other	21294	kg/d	B100	14769	kg/d
					Glycerol+ Triglyceride	6525	kg/d
	Addition	B100 from #2	59070	kg/d	Biodiesel	73839	kg/d
		B100 from #3	14769	kg/d			
		kerobit	180	mg/d			
Glycerol Purification	Storage gly	Glycerol from separator & storage	10000	kg/d	Glycerol	10000	kg/d
	Neutralization	Glycerol	10000	kg/d	Oil+B100	790	kg/d
		H_3PO_4	290	kg/d	MeOH+Gly+ other	9500	kg/d
	Cooling tank	MeOH+Gly+ other	9500	kg/d	MeOH+Gly+ other	9500	kg/d
	Filter press	MeOH+Gly+ other	9500	kg/d	Gly+other	9000	kg/d
					sludge	500	kg/d
	Storage	Gly+other	9000	kg/d	Gly+other	9000	kg/d
	Distill Gly#1	Gly+other	9000	kg/d	impure MeOH	1911	kg/d
					other	7089	kg/d

กระบวนการ	ขั้นตอนย่อย	สารเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารออก	ปริมาณ	หน่วย
	Distill Gly#2	other	7089	kg/d	H_2O evaporate	less	kg/d
					other	7089	kg/d
	Distill Gly#3	other	7089	kg/d	Gly	3889	kg/d
					Waste	3200	kg/d
	Stripper	Gly	3889	kg/d	steam out	6	kg/d
		steam in	5	kg/d	Gly	3888	kg/d
	C adsorption	Gly	3888	kg/d	C waste	17	kg/d
		Act.C	17	kg/d	Pure Glycerol	3888	kg/d
Methanol Purification	Storage MeOH	impure MeOH D#1	5922	kg/d	impure MeOH	7833	kg/d
		impure MeOH DG#1	1911	kg/d			
	Distill MeOH	impure MeOH	7833	kg/d	MeOH	7746	kg/d
					H_2O+B100	87	kg/d
	Phase separate	H_2O+B100	87	kg/d	B100	34.8	kg/d
	Condenser	MeOH	7746	kg/d	Pure MeOH	7746	kg/d

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-3 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

กระบวนการ		ปริมาณไฟฟ้า (hp)	ปริมาณไฟฟ้า (kW)	การใช้งาน (hr/d)	การใช้ไฟฟ้า (kWh)	ผลรวม (kWh)	ร้อยละ (%)
Reaction	Mixer MeOH&$NaOCH_3$	7.5	5.59275	24	134.226	581.64600	14.94
	reactor	25	18.6425	24	447.42		
Biodiesel Purification	Distil#1 condenser(chw)	15	11.1855	24	268.452	1342.26000	34.48
	Distil#2 condenser(cw)	30	22.371	24	536.904		
	Distil#3 condenser(cw)	30	22.371	24	536.904		
Glycerol Purification	Neutralization	15	11.1855	24	268.452	1700.19600	43.68
	Cooling tank	30	22.371	24	536.904		
	Filter press	5	3.7285	24	89.484		
	Distil#1 condenser(chw)	15	11.1855	24	268.452		
	Distil#2 condenser(chw)	15	11.1855	24	268.452		
Glycerol Purification	Distil#3 condenser(chw)	15	11.1855	24	268.452		
Methanol Purification	distil condenser(chw)	15	11.1855	24	268.452	268.45200	6.90
Total		217.5	162.190		3892.554	3892.55400	100

ตารางที่ 4-4 ปริมาณการใช้น้ำมันเตา

กระบวนการ	การใช้น้ำมันเตา (L/d)	ร้อยละ (%)
Reaction	600	10.62
Biodiesel Purification	2800	49.56
Gly Purification	1600	28.32
MeOH Purification	650	11.50
Total	5650	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-5 ปริมาณการใช้น้ำ

กระบวนการ	ขั้นตอนย่อย	ปริมาณการใช้น้ำ	หน่วย
Reaction	Distillation	120	L/d
Glycerol purification	Distillation	120	L/d
	Cooling glycerol before filter press	83.33	L/d
	Steam for glycerol stripper	5	L/d
Methanol purification	Distillation for methanol purification	40	L/d
Total		368.33	L/d

ตารางที่ 4-6 ปริมาณการใช้โซเดียมคลอไรด์ในการรีเจนเนอร์เรชันถังแลกเปลี่ยนไอออน

กระบวนการ	ปริมาณการใช้โซเดียมคลอไรด์	หน่วย
Biodiesel purification	171.42857	L/d
Glycerolpurification	171.42857	L/d
Methanol purification	57.14286	L/d
Total	400	L/d

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบ

	วัตถุดิบ	ยานพาหนะ	ขนส่งจาก	ระยะทาง (To factory) (km)	ระยะทาง (From factory) (km)
1	Palm stearin	truck 10 wheel	Samutsakorn	10	10
2	MeOH	truck 10 wheel	Sriracha Rayong	80	80
3	$NaOCH_3$	ship+truck	China	4020+80	80
4	Kerobit	ship+truck	Germany	17281.8+80	80
5	H_3PO_4	ship+truck	China	4020+80	80
6	Activated carbon	truck 10 wheel	Rayong	80	80
7	Fuel oil	truck 10 wheel	Samutsakorn	12	12
8	NaCl	truck 10 wheel	Samutsakorn	10	10

4.1.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process)

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลแบบเปียก (Wet process) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตเป็นหลัก จึงก่อให้เกิดน้ำเสีย และต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียภายในโรงงาน การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยมีเบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา มีน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) ไขปาล์มหรือปาล์มสเตียรีน (Palm stearin) เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งการผลิตขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้น จึงประกอบไปด้วย 5 กระบวนการได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลดิบ และการทำแอลกอฮอล์ให้บริสุทธิ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-3 และสามารถสรุปมวลสารเข้า สารออกได้ดังภาพที่ 4-4

กรณีการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ (CPO pretreatment) น้ำมันปาล์มดิบต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบมีลักษณะข้น หนืด มีสี กลิ่นเหม็นหืน และมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอที่จะทำไบโอดีเซล จึงต้องมีการขจัดยางเหนียว (Degumming) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ที่อาจปนอยู่กับสารไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) เช่น สารกลุ่มฟอสโฟไลพิด (Phospholipid) เป็นต้น โดยใช้กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ในการกำจัด จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการฟอกสี (Bleaching) โดยใช้ผงฟอกสี (Bleaching earth) ได้แก่ โซเดียมเบนโทไนต์ในการฟอก จึงทำให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิต คือ ผงฟอกสีซึ่งใช้งานแล้ว (Spent clay) ต่อมาเข้าสู่ขั้นตอนการขจัดกลิ่น (Deordorization) โดยนำไปผ่านความร้อนเพื่อกำจัดทั้งฟองอากาศและกลิ่น ส่วนไอระเหยจะมีการรวบรวมนำไปควบแน่นจะได้กรดไขมันปาล์ม (Palm fatty acid distillate, PFAD) และน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined bleached deodorized palm oil, RBD PO) ซึ่งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์สามารถส่งเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันได้โดยตรง เพราะมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อย ส่วนกรดไขมันปาล์มซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงนั้น จะต้องผ่านขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification process) ใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบ ในอัตราส่วนร้อยละ 55 ต่อ 45 ต่อเดือนตามลำดับ โดยมีโซเดียมเมทิลเลต ($NaOCH_3$) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้แก่ เมทานอล และเมทานอลจากการรีไซเคิล เมื่อปล่อยทิ้งไว้จะเกิดการแยกชั้นตามความหนาแน่น ซึ่งเอสเตอร์จะลอยอยู่บนกลีเซอรอล ทำให้สามารถแยกเอสเตอร์เข้าสู่กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ได้ ในส่วนของกลีเซอรอลจะนำเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอล แต่ไม่ใช่การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ เป็นเพียงการบำบัดขั้นต้นเท่านั้น

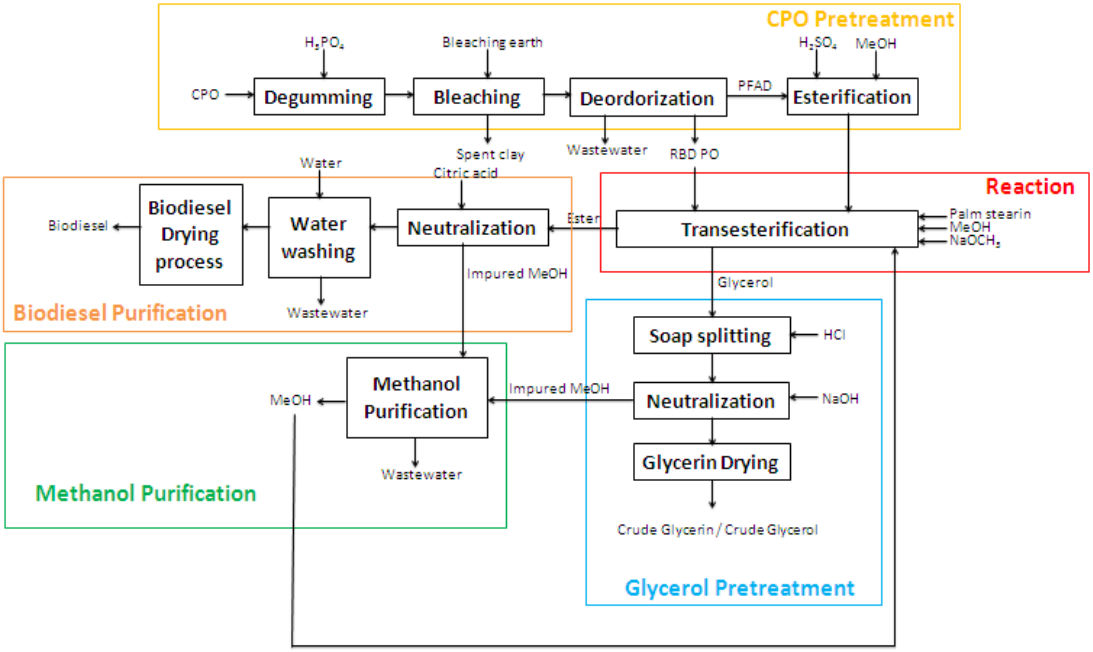
กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification) หลังจากแยกเอสเตอร์แยกออกมาจะนำมาทำให้เป็นกลาง (Neutralization) ด้วยกรดซิตริก (Citric acid) จากนั้นจะผ่านขั้นตอนการล้างด้วยน้ำ (Washing water) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล และทำให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิต เอสเตอร์ที่ผ่านการล้างน้ำจะยังคงเหลือน้ำปนอยู่จึงต้องนำเข้าสู่ขั้นตอนการขจัดน้ำออก (Biodiesel drying) ด้วยวิธีการต้มที่อุณหภูมิประมาณ 120 อาศาเซลเซียส ทำให้น้ำระเหยออก เพื่อให้ได้เป็นไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (B100)

การปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น (Glycerol pretreatment) เริ่มจากขั้นตอนการกำจัดสบู่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และผ่านขั้นตอนขจัดสิ่งเจือปน (Glycerin drying) ได้เป็นกลีเซอรีนดิบ ซึ่งจะนำไปขายต่อไป ส่วนของเสียจากการปรับสภาพนั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยเมทานอล ซึ่งจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ต่อไป

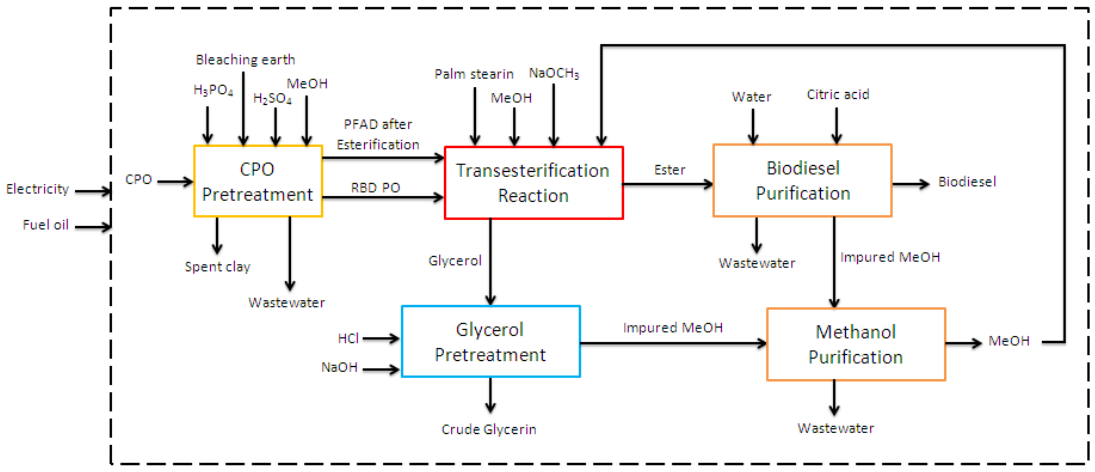
กระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (Methanol purification) ซึ่งรวบรวมเมทานอลจาก 2 หน่วยคือ หน่วยการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ และหน่วยปรับปรุงคุณภาพการบำบัดกลีเซอรอลขั้นต้น โดยใช้วิธีการกลั่น จะได้เมทานอลบริสุทธิ์ ซึ่งจะถูกนำกลับไปใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอร์ริฟิเคชันต่อไป และของเสียจากการกลั่นเป็นน้ำเสียที่จะถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดต่อไป

โรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีกำลังการผลิตไบโอดีเซล 360,000 สิตรต่อวัน โดยทำการสำรวจภาคสนามรวบรวมข้อมูลจากการสอบถาม สัมภาษณ์ เป็นข้อมูลดิบแสดงดังตารางที่ 4-8 พลังงานที่ใช้ในการผลิตได้แก่ พลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และพลังงานความร้อนจากน้ำมันเตา (ทางโรงงานจะมีการปรับเปลี่ยนไปใช้ก๊าซธรรมชาติในอนาคต) โดยแสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 4-9 ส่วนน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตนั้น ทางโรงงานใช้น้ำบาดาลซึ่งมีสถานีสูบน้ำและการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำมาใช้ ด้วยวิธีการรีเวอร์สออสโมซิส (Reversed osmosis, RO) ก่อนเข้าสู่ระบบแจกจ่ายน้ำ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งการสูบและการจ่ายน้ำแสดงดังตารางที่ 4-10 การใช้น้ำในกระบวนการผลิตมี 2 กระบวนการคือ การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น และการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยปริมาณไฟฟ้าที่ใช้สำหรับสถานีสูบและจ่ายน้ำจึงขึ้นกับทั้ง 2 กระบวนการด้วย ดังตารางที่ 4-11 ซึ่งน้ำเสียจากทั้ง 2 กระบวนการนี้ รวมถึงน้ำเสียจากกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ จะรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ก่อนเข้าสู่การบำบัดแบบใช้อากาศ (ปล่อยไหลตามธรรมชาติ) ดังนั้นไฟฟ้าที่ใช้จึงใช้ในเฉพาะการบำบัดแบบใช้อากาศเท่านั้น น้ำเสียมีค่า COD (Chemical oxygen demand) อยู่ในช่วง 3,000 ถึง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นจะนำกลับไปใช้ใหม่ โดยนำไปรดน้ำต้นไม้ หรือใช้ภายในห้องน้ำเป็นต้น ข้อมูลการเกิดน้ำเสียและปริมาณไฟฟ้าที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4-12 ข้อมูลการขนส่งแสดงดัง

ตารางที่ 4-13 โดยเป็นข้อมูลที่ทางโรงงานเป็นผู้ระบุโดยตรง ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการขนส่งวัตถุดิบทั้งหมด



ภาพที่ 4-3 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process)



ภาพที่ 4-4 มวลสารเข้าและสารออกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process)

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบ	**ปริมาณ**	**หน่วย**
CPO	314773.86930	kg/d
H_3PO_4	472.16080	kg/d
Bleaching earth	4721.60804	kg/d
RBD PO	299035.17590	kg/d
PFAD	15738.69347	kg/d
H_2SO_4	157.38693	kg/d
Palm stearin	314773.86930	kg/d
MeOH for esterification	15738.69347	kg/d
MeOH new for transesterification	16084.94472	kg/d
$NaOCH_3$	6925.02513	kg/d
HCl	3525.46734	kg/d
NaOH	251.81909	kg/d
Citric acid ($C_6H_{10}O_8$)	250.00000	kg/d
B100	313200.00000	kg/d
Crude Glycerol	42494.47236	kg/d
MeOH recycle for transesterification	15014.71357	kg/d

ตารางที่ 4-9 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าและน้ำมันเตาในกระบวนการผลิต

กระบวนการ	**ปริมาณการใช้ไฟฟ้า**	**หน่วย**	**ปริมาณการใช้น้ำมันเตา**	**หน่วย**
CPO pretreatment	4300	kwh	3500	kg/d
Reaction	232.5	kwh	1700	kg/d
Biodiesel purification	232.5	kwh	1700	kg/d
Glycerol pretreatment	232.5	kwh	1700	kg/d
Methanol purification	232.5	kwh	1700	kg/d

ตารางที่ 4-10 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าสำหรับสถานีสูบและจ่ายน้ำ

การสูบน้ำ (RO unit)		**ปริมาณเครื่องสูบน้ำ (ตัว)**	**การใช้ไฟฟ้า (kW/pump)**	**ผลรวมการใช้ไฟฟ้า (kW)**	**การทำงาน (hr/d)**	**ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh)**
1	Raw water feed pump	2	1.76	3.52	24	84.48
2	high pressure pump	1	5.5	5.5	24	132
3	R/O water supply pump	1	0.94	0.94	24	22.56
การจ่ายน้ำ (Soft unit)		**ปริมาณเครื่องสูบน้ำ (ตัว)**	**การใช้ไฟฟ้า (kW/pump)**	**ผลรวมการใช้ไฟฟ้า (kW)**	**การทำงาน (hr/d)**	**ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh)**
1	Raw water tank transfer pump	2	5.5	11	24	264
2	Filtered water transfer pump	2	11	22	24	528

ตารางที่ 4-11 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตและการใช้ไฟฟ้าสำหรับสถานีสูบจ่ายน้ำ

กระบวนการ	**ปริมาณการใช้น้ำ (m^3/d)**	**ปริมาณการใช้น้ำ (kg/d)**	**ปริมาณการใช้ไฟฟ้าสำหรับสถานีสูบและจ่ายน้ำ (kWh)**
CPO pretreatment	60	60000	859.2
Reaction	0	0	0
Biodiesel purification	12	12000	171.84
Glycerol pretreatment	0	0	0
Methanol purification	0	0	0
Total		72000	1031.04

ตารางที่ 4-12 ปริมาณน้ำเสียและปริมาณไฟฟ้าสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการ	**ปริมาณน้ำเสีย**	**หน่วย**	**ปริมาณการใช้ไฟฟ้าสำหรับระบบบำบัด**	**หน่วย**
CPO pretreatment	60	m^3/d	188.9362	kWh
Reaction	0	m^3/d	0	kWh
Biodiesel purification	48	m^3/d	151.1489	kWh
Glycerol pretreatment	0	m^3/d	0	kWh
Methanol purification	4.8	m^3/d	15.11489	kWh
Total	112.8	m^3/d	355.19999	kWh

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-13 ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	ประเภทรถ	ขนส่งจาก	เชื้อเพลิง	ระยะทาง (One-way) (km)	การขนส่งสูงสุด (Full load)
CPO	Oil truck	สุราษฎร์ธานี	น้ำมันดีเซล	500	30 ตัน
H_3PO_4	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	1 ตัน
Bleaching earth	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	20 ตัน
H_2SO_4	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	1 ตัน
Palm stearin	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	30 ตัน
Methanol	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	30 ตัน
SodiumMethyllate	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	20 ตัน
HCl	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	3 ตัน
Citric acid	รถเทรลเล่อ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	1 ตัน
NaOH	รถกระบะ	กทม.- ปริมณฑล	น้ำมันดีเซล	100	1 ตัน
Fuel Oil	Oil truck 15000-30000 ลิตร	บางจาก ปิโตรเลียม (สุขุมวิท)	น้ำมันดีเซล	100	30 ตัน

4.1.3 การผลิตน้ำมันปาล์ม

การผลิตน้ำมันปาล์ม หมายถึงโรงงานที่ทำการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ แล้วนำมาผ่านกระบวนการผลิตเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และไขปาล์ม โดยเป็นการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ ภายในประเทศไทย ข้อมูลที่รวบรวมได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งทำการหาค่าเฉลี่ยจาก 3 งานวิจัย (Musikavong C. และคณะ, 2012) (Gheewala S.H. และคณะ, 2012) (Chavalparit O. และคณะ, 2006) เพื่อให้ได้ตัวแทนข้อมูลในการนำมาคำนวณ ส่วนที่สองคือการผลิตปาล์มสเตียรีนหรือไขปาล์ม อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Gheewala S.H. และคณะ (2009) ทะลายปาล์มหลังจากการเก็บเกี่ยวจะขนส่งไปยังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มภายใน 24 ชั่วโมง เนื่องจากจะช่วยรักษาคุณภาพของน้ำมันปาล์มไม่ให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระมากจนส่งผลกระทบต่อการผลิต ดังนั้นโรงงานจึงมักตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้แก่ น้ำ ไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และสารเคมีต่างๆ เช่น คาโอลิน (Kaolin) ใช้ในการแยกกะลาปาล์มออกจากเปลือกปาล์ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ แอนไอออนิกโพลิเมอร์ กรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำมาใช้ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตนั้นมาจากการล้างผลปาล์ม การนึ่งปาล์ม โดยทั่วไปน้ำเสียมีสารอินทรีย์สูง มีค่า COD (Chemical oxygen demand) โดยเฉลี่ยประมาณ 67,453 มิลลิกรัมต่อลิตร (Musikavong C. และคณะ, 2012)

จึงต้องบำบัดด้วยวิธีไร้อากาศ ซึ่งจากข้อมูลที่รวบรวมเป็นการบำบัดแบบบ่อโดยไม่มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพหรือก๊าซมีเทนกลับมาใช้งาน ของเสียอื่นๆ ที่เกิดขึ้นได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch, EFB) และของเสียจากเศษปาล์ม (Decanter cake) ซึ่งสามารถนำไปหมักเป็นปุ๋ยกลับไปใช้ในขั้นตอนการเพาะปลูกปาล์ม หรือนำไปใช้ในการเพาะปลูกเห็ดได้ นอกจากผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็นน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) แล้วยังมีผลิตภัณฑ์รองได้แก่ ใยปาล์ม (Fiber) กะลาปาล์ม (Shell) และเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel) ซึ่งใยปาล์มทางโรงงานจะนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และไอน้ำ กลับไปใช้ภายในโรงงาน ส่วนกะลาปาล์มและเมล็ดในปาล์ม สามารถนำไปผลิตถ่านกัมมันต์ได้ (Activated carbon) จากนั้นน้ำมันปาล์มดิบจะส่งไปยังอีกหน่วยการผลิตภายในโรงงานเดียวกันคือ กระบวนการผลิตปาล์มสเตียรีน น้ำมันปาล์มดิบจะนำไปผ่านการกลั่น การกำจัดยางเหนียว การฟอกสี การกำจัดกลิ่น และการแยกส่วน (Fractionation) ซึ่งจะแยกได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์หรือเรียกอีกชื่อว่า น้ำมันปาล์มโอเลอิน (Palm olein) ซึ่งนำไปบริโภคเป็นน้ำมันพืชในการประกอบอาหาร หรือผลิตไบโอดีเซล อีกส่วนที่แยกได้คือปาล์มสเตียรีนหรือไขปาล์ม ซึ่งสามารถนำไปผลิตเนย ผลิตเวชภัณฑ์เครื่องสำอางต่างๆ หรือนำไปผลิตไบโอดีเซล โดยอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มโอเลอินกับปาล์มสเตียรีนประมาณร้อยละ 71 ต่อ 29 (Malakul P. และคณะ, 2010) ข้อมูลทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเป็นข้อมูลดิบดังตารางที่ 4-14 การแยกส่วนสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ 1) การแยกส่วนแบบแห้ง (Dry fractionation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ เพราะเป็นวิธีที่ง่าย แต่ได้ปาล์มโอเลอินประมาณร้อยละ 60 โดยทำการหล่อเย็นน้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิประมาณ 22 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของปาล์มสเตียรีน จากนั้นทำการแยกปาล์มสเตียรีน (ลักษณะเป็นไข) และปาล์มโอเลอิน (ลักษณะเป็นของเหลว) ออกจากกันเช่น วิธีเมมเบรน (Membrane) การบีบอัด (Filter press) การแยกด้วยสุญญากาศ (Vacuum suction) การปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นต้น 2) การแยกด้วยสารซักฟอก (Detergent fractionation) มีข้อดีคือ แยกได้ดีกว่า และเกิดผลึกปาล์มสเตียรีนได้เร็วกว่าวิธีการแยกส่วนแบบแห้ง โดยทำการหล่อเย็นน้ำมันปาล์มดิบที่อุณหูมิ ณ จุดเยือกแข็งของปาล์มสเตียรีน แล้วเติมสารซักฟอกเช่น โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulphate, SLS) จะเกิดการแยกชั้นโดยเกิดการตกตะกอนของปาล์มสเตียรีน จากนั้นทำการแยกด้วยการปั่นเหวี่ยง 3) การแยกด้วยสารละลาย (Solvent fractionation) วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูง แต่มีการลงทุนสูง สารละลายที่ใช้ทั่วไปเช่น เฮกเซน อะซิโตน เป็นต้น เริ่มจากผสมน้ำมันปาล์มดิบกับสารละลาย แล้วทำการหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของปาล์มสเตียรีน จากนั้นแยกด้วยวิธีการกรอง หรือแยกด้วยสุญญากาศ จะได้ปาล์มโอเลอินและปาล์มสเตียรีนซึ่งประกอบด้วยสารละลายผสมอยู่ ดังนั้นต้องมีกระบวนการแยกสารละลายกลับมาใช้ใหม่ (Mohd Suria Affandi Y., 1994)

ตารางที่ 4-14 ข้อมูลปริมาณมวลสารเข้าและสารออกของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม

การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ	**สารเข้าหรือสารออก**	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**แหล่งที่มา**
สารเข้า	Fresh fruit bunches (ทะลายปาล์ม)	5.64563	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012) (Gheewala S.H. และคณะ, 2012) (Chavalparit O. และคณะ, 2006)
	Water	0.00631	m^3/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012) (Chavalparit O. และคณะ, 2006)
	Electricity from grid	0.05723	kWh/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012) (Gheewala S.H. และคณะ, 2012) (Chavalparit O. และคณะ, 2006)
	Diesel	0.00295	kg/kgCPO	
	Kaolin (Separate PK from shell)	0.01164	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012)
For water treatment	Polyaluminium chloride	0.00033	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012)
	anionic polymer	0.00049	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012)
	HCl	0.00153	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012)
	NaOH	0.00143	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012)
สารออก	Crude palm oil (ผลิตภัณฑ์หลัก)	1	kg/kgCPO	(Musikavong C. และคณะ, 2012) (Gheewala S.H. และคณะ, 2012) (Chavalparit O. และคณะ, 2006)
	Palm kernel (เมล็ดในปาล์ม)	0.34470	kg/kgCPO	
	Fibers	0.68209	kg/kgCPO	
	Shells (กะลาปาล์ม)	0.35804	kg/kgCPO	
	Empty fruit bunches (ทะลายปาล์มเปล่า)	1.38882	kg/kgCPO	
	Decanter cake	0.23667	kg/kgCPO	
	Palm oil mill effluent (POME)	0.00499	m^3/kgCPO	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ	สารเข้าหรือสารออก	ปริมาณ	หน่วย	แหล่งที่มา
สารเข้า	Crude palm oil	2.98318	kg/LB100	(Malakul P. และคณะ, 2010)
	Electricity	0.00405	kWh/LB100	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)
สารออก	RBD Palm Olein	2.11806	kg/LB100	(Malakul P. และคณะ, 2010)
	RBD Palm Stearin	0.86512	kg/LB100	

4.1.4 การปลูกปาล์มน้ำมัน

ในประเทศไทยปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่มักปลูกบริเวณแถบภาคใต้ของประเทศ เนื่องจากมีสภาพอากาศ ลักษณะภูมิประเทศเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปาล์ม โดยเฉพาะจังหวัดกระบี่ ชุมพร และสุราษฎ์ธานี ข้อมูลทำการรวบรวมจากงานวิจัยต่างๆ ภายในประเทศ ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบดังนี้ เมล็ด ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยฟอสฟอรัส ปุ๋ยโปตัสเซียม และยาปราบวัชพืช (Paraquat และ Glyphosate) การขนส่งวัตถุดิบนั้นสามารถรวบรวมข้อมูลได้เพียงการขนส่งปุ๋ยเท่านั้นด้วยระยะทางประมาณ 865 กิโลเมตร โดยข้อมูลดิบสรุปได้ดังตารางที่ 4-15 ผลผลิตที่ได้คือ ทะลายปาล์ม (Fresh fruit bunch, FFB) ใช้เมล็ดในการเพาะปลูกประมาณ 168 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ ความหนาแน่นของการปลูก 131 ถึง 137 ต้นต่อเฮกแตร์ หลังจากการปลูกจะเริ่มให้ผล (ทะลายเล็ก) เมื่ออายุประมาณ 30 เดือน และให้ผลเต็มที่ (ทะลายใหญ่) เมื่ออายุ 5 ปีขึ้นไป มีรอบการเก็บเกี่ยวประมาณ 15 วันต่อครั้ง น้ำหนักเฉลี่ยควรมากกว่า 15 กิโลกรัมต่อทะลาย ซึ่งโดยเฉลี่ยในประเทศไทยปลูกปาล์มได้ 17.5 ตันทะลายปาล์มต่อเฮกแตร์ต่อปี มีช่วงชีวิตเฉลี่ยประมาณ 25 ปี มีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปตัสเซียม ปริมาณ 151 72 และ 307 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ต่อปี ตามลำดับ ยาปราบวัชพืชชนิด Glyphosate ใช้ปริมาณ 4.8 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ต่อปี ยาปราบวัชพืชชนิด Paraquat ใช้ 1.6 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ต่อปี (Gheewala S.H. และคณะ, 2012) และมีการใช้น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องจักร อุปกรณ์ทางการเกษตรต่างๆ น้ำที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกเป็นน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยเฉพาะจากน้ำฝน และใช้น้ำจากการชลประทาน ซึ่งข้อมูลทั้งหมดทำการรวบรวมข้อมูลจาก 2 งานวิจัย (Gheewala S.H. และคณะ, 2012) (Gheewala S.H. และคณะ, 2009) แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณของงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพืช (Carbon sequestration) ซึ่งปาล์มน้ำมันสามารถกักเก็บคาร์บอนได้เท่ากับ 2.49 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไร่ต่อปี หรือเท่ากับ 15.69 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเฮกแตร์ต่อปี (ดำรงค์ ศรีพระราม, 2554)

ตารางที่ 4-15 ข้อมูลสารเข้าและสารออกของขั้นตอนการปลูกปาล์มน้ำมัน

การปลูกปาล์มน้ำมัน	**สารเข้าหรือสารออก**	**ปริมาณ**	**หน่วย**	**แหล่งที่มา**
สารเข้า	Seed	0.009748	kg/kgFFB	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)
	N fertilizer	0.00822	kg/kgFFB	(Gheewala S.H. และคณะ, 2012)
	P_2O_5 fertilizer	0.002081	kg/kgFFB	
	K_2O fertilizer	0.015966	kg/kgFFB	
	Glyphosate	0.000277	kg/kgFFB	
	Paraquat	9.96×10^{-5}	kg/kgFFB	
	Diesel (farm equipment)	0.000299	kg/kgFFB	(Gheewala S.H. และคณะ, 2012)
สารออก	FFB	1	kg/kgFFB	(Gheewala S.H. และคณะ, 2012) (Gheewala S.H. และคณะ, 2009)

4.1.5 การขนส่ง

การขนส่งในการศึกษานี้จะรวมตั้งแต่การขนส่งทะลายปาล์มจากแหล่งเพาะปลูกมายังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่งปาล์มสเตียรีนหรือไขปาล์มมายังโรงงานผลิตไบโอดีเซล ซึ่งการขนส่งทะลายปาล์มเป็นการอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยภายในประเทศ ขนส่งโดยรถกระบะบรรทุก 10 ล้อ ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นแหล่งเชื้อเพลิง ระยะทางโดยประมาณ 60 กิโลเมตร ดังนั้นระยะทางขนส่งไปกลับ 120 กิโลเมตร ส่วนการขนส่งปาล์มสเตียรีน ข้อมูลได้มาจากการสอบถาม สัมภาษณ์ จากโรงงานผลิตไบโอดีเซล โดยโรงงานวีระสุวรรณ จังหวัดสมุทรสาคร ใช้รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ มีน้ำมันดีเซลเป็นแหล่งเชื้อเพลิง ขนส่งจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มตราโอลีนเป็นระยะทาง 10 กิโลเมตร ส่วนโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ใช้รถบรรทุกน้ำมันขนาด 30 ตัน ซึ่งใช้น้ำมันดีเซลขนส่งจากกรุงเทพฯ เป็นระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร (One-way)

4.1.6 บัญชีข้อมูล (Life Cycle Inventory)

จากการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้นั้น นำมาทำสมดุลมวลสาร (Material balance) แล้วคำนวณต่อหน่วยหน้าที่ (Functional unit, FU) ซึ่งหน่วยหน้าที่หรือหน่วยอ้างอิงของงานวิจัยนี้คือการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร โดยแบ่งบัญชีข้อมูลออกเป็น 2 ประเภทคือ ข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งของโรงงานวีระสุวรรณ และข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกของโรงงานบางจากไบโอฟูเอล ข้อมูลทั้ง 2 โรงงานสามารถสรุปตลอดทั้งกระบวนการผลิตตั้งแต่การปลูกปาล์มน้ำมัน จนถึงการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 4-16 และตารางที่ 4-17 เนื่องจากแต่ละโรงงานมีวัตถุดิบ กระบวนการผลิต ทั้งเหมือนและแตกต่างกัน โดยสิ่งที่เหมือนกันคือ วัตถุดิบหลักประกอบด้วยปาล์มสเตียรีน เมทานอล โซเดียมเมทิลเลต และใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลเหมือนกัน ส่วนสิ่งที่แตกต่างกันคือ โรงงานบางจากไบโอฟูเอลใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบร่วมกับปาล์มสเตียรีนในการผลิตไบโอดีเซล ในขณะที่โรงงานวีระสุวรรณใช้เพียงปาล์มสเตียรีนเท่านั้น ทำให้โรงงานบางจากไบโอฟูเอลต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำมันปาล์มดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการ ทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน อีกทั้งในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ซึ่งโรงงานวีระสุวรรณใช้วิธีการกลั่น ส่วนโรงงานบางจากไบโอฟูเอลใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ และในกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์นั้น โรงงานบางจากไบโอฟูเอลทำเพียงการบำบัดขั้นต้นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งของเสียจากทั้ง 2 โรงงาน มีการบำบัดและสามารถนำส่งขายต่อได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-16 บัญชีข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งของโรงงานวีระสุวรรณ

สารขาเข้าและสารขาออก		ปริมาณ	หน่วย
Oil palm cultivation	Seed	0.16418	kg/L B100
	N fertilizer	0.13844	kg/L B100
	P_2O_5 fertilizer	0.03504	kg/L B100
	K_2O fertilizer	0.26889	kg/L B100
	Glyphosate	0.00467	kg/L B100
	Paraquat	0.00168	kg/L B100
	Diesel	0.00503	kg/L B100
	Diesel (combustion)	0.00503	kg/L B100
	Diesel (truck fertilizers one-way)	865.00000	Km
	Fresh fruit bunches	16.84194	kg/L B100
Palm oil mill	Kaolin (separation PK from shell)	0.03472	kg/L B100
	Polyaluminium chloride (water treatment)	0.00098	kg/L B100
	Anionic polymer (water treatment)	0.00146	kg/L B100
	HCl (water treatment)	0.00456	kg/L B100
	NaOH (water treatment)	0.00427	kg/L B100
	Electricity (CPO extraction)	0.17073	kWh/L B100
	Water	0.01881	m^3/L B100
	Diesel	0.00880	kg/L B100
	Diesel (combustion)	0.00880	kg/L B100
	Electricity (CPO refining)	0.00405	kWh/L B100
	Wastewater (Palm oil mill effluent)	0.01489	m^3/L B100
	Palm kernel	1.02832	kg/L B100
	Fibers	2.03479	kg/L B100
	Shells	1.06809	kg/L B100
	Empty fruit bunches	4.14310	kg/L B100
	Decanter cake	0.70602	kg/L B100
	RBD Palm olein	2.11806	kg/L B100
	RBD Palm stearin	0.86512	kg/L B100
Biodiesel Production Plant	**Reaction process**		
	MeOH	0.18659	kg/L B100
	$NaOCH_3$	0.00589	kg/L B100
	Refeed distillation waste	0.07688	kg/L B100
	Electricity	0.00685	kWh/L B100
	Fuel oil	0.00707	L/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00707	L/L B100
	Diesel (truck MeOH round-trip)	160.00000	Km
	Diesel ($NaOCH_3$ one-way ship & two-way truck)	4180.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.00000	Km

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารขาเข้าและสารขาออก		ปริมาณ	หน่วย
Biodiesel Production Plant (Veerasuwan factory)	**Biodiesel purification process**		
	Kerobit	0.00212	mg/L B100
	NaCl (water treatment)	0.00202	L/L B100
	Electricity	0.01582	kWh/L B100
	Water	0.00141	kg/L B100
	Fuel oil	0.03299	L/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.03299	L/L B100
	Diesel (kerobit one-way ship & two-way truck)	17441.80000	Km
	Diesel (truck NaCl round-trip)	20.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.00000	Km
	Biodiesel (B100)	1	L/L B100
	Glycerol purification process		
	H_3PO_4 (neutralization)	0.00342	kg/L B100
	Activated carbon	0.00020	kg/L B100
	NaCl (water treatment)	0.00202	L/L B100
	Electricity	0.02003	kWh/L B100
	Water	0.00245	kg/L B100
	Fuel oil	0.01885	L/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.01885	L/L B100
	Diesel (H_3PO_4 one-way ship & two-way truck)	4180.00000	Km
	Diesel (truck activated carbon round-trip)	160.00000	Km
	Diesel (truck NaCl round-trip)	20.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.00000	Km
	Pure Glycerol (99%)	0.04581	kg/L B100
	Methanol purification process		
	NaCl (water treatment)	0.00067	L/L B100
	Electricity	0.00316	kWh/L B100
	Water	0.00047	kg/L B100
	Fuel oil	0.00766	L/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00766	L/L B100
	Diesel (truck NaCl round-trip)	20.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.00000	Km
	Pure methanol (99.8%)	0.09127	kg/L B100
Transport	Diesel (truck FFB round-trip)	120.00000	Km
	Diesel (truck palm stearin round-trip)	20.00000	Km

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-17 บัญชีข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกของโรงงานบางจากไบโอฟูเอล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

สารขาเข้าและสารขาออก		ปริมาณ	หน่วย
Oil palm cultivation	Seed	0.07467	kg/L B100
	N fertilizer	0.06296	kg/L B100
	P_2O_5 fertilizer	0.01594	kg/L B100
	K_2O fertilizer	0.12230	kg/L B100
	Glyphosate	0.00212	kg/L B100
	Paraquat	0.00076	kg/L B100
	Diesel	0.00229	kg/L B100
	Diesel (combustion)	0.00229	kg/L B100
	Diesel (truck fertilizers one-way)	865.00000	Km
	Fresh fruit bunches	7.65990	kg/L B100
Palm oil mill	Kaolin (separation PK from shell)	0.01579	kg/L B100
	Polyaluminium chloride (water treatment)	0.00045	kg/L B100
	Anionic polymer (water treatment)	0.00066	kg/L B100
	HCl (water treatment)	0.00208	kg/L B100
	NaOH (water treatment)	0.00194	kg/L B100
	Electricity (CPO extraction)	0.07765	kWh/L B100
	Water	0.00855	m^3/L B100
	Diesel	0.00400	kg/L B100
	Diesel (combustion)	0.00400	kg/L B100
	Electricity (CPO refining)	0.00184	kWh/L B100
	Wastewater (Palm oil mill effluent)	0.00677	m^3/L B100
	Palm kernel	0.46769	kg/L B100
	Fibers	0.92545	kg/L B100
	Shells	0.48578	kg/L B100
	Empty fruit bunches	1.88433	kg/L B100
	Decanter cake	0.32111	kg/L B100
	RBD Palm olein	0.96332	kg/L B100
	RBD Palm stearin	0.39347	kg/L B100
Biodiesel Production Plant (Bangchak biofuel factory)	**CPO Pretreatment**		
	CPO (Crude palm oil)	0.48090	kg/L B100
	H_3PO_4	0.00131	kg/L B100
	Bleaching earth (Sodium based)	0.01312	kg/L B100
	H_2SO_4	0.00044	kg/L B100
	MeOH	0.04372	kg/L B100
	Electricity	0.01194	kWh/L B100
	Water (Ground water)	0.16667	kg/L B100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารขาเข้าและสารขาออก		ปริมาณ	หน่วย
Biodiesel Production Plant (Bangchak biofuel factory)	Electricity for pumping station	0.00239	kWh/L B100
	Fuel oil	0.00972	kg/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00972	kg/L B100
	Diesel (truck CPO round-trip)	1000.00000	Km
	Diesel (truck H_3PO_4 round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck bleaching earth round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck H_2SO_4 round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck methanol round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.00000	Km
	Wastewater (anaerobic & aerobic)	0.16667	kg/L B100
	Reaction Process		
	$NaOCH_3$	0.01924	kg/L B100
	MeOH (new)	0.04468	kg/L B100
	MeOH (from methanol purification process)	0.04171	kg/L B100
	Electricity	0.00065	kWh/L B100
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100
	Diesel (truck $NaOCH_3$ round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck methanol round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.00000	Km
	Biodiesel Purification Process		
	Citric acid	0.00069	kg/L B100
	Electricity	0.00065	kWh/L B100
	Water (Ground water)	0.03333	kg/L B100
	Electricity for pumping station	0.00048	kWh/L B100
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100
	Diesel (truck citric acid round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.00000	Km
	Wastewater (anaerobic & aerobic)	0.13333	kg/L B100
	Biodiesel (B100)	1	L/L B100
	Glycerol Pretreatment Process		
	HCl	0.00979	kg/L B100
	NaOH	0.00070	kg/L B100
	Electricity	0.00065	kWh/L B100
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100
	Diesel (truck HCl round-trip)	200.00000	Km

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารขาเข้าและสารขาออก		ปริมาณ	หน่วย
Biodiesel Production Plant (Bangchak biofuel factory)	**Glycerol Pretreatment Process**		
	Diesel (truck NaOH round-trip)	200.00000	Km
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.00000	Km
	Crude glycerol	0.11804	kg/L B100
	Methanol Purification Process		
	Electricity	0.00065	kWh/L B100
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.00000	Km
	Wastewater (anaerobic & aerobic)	0.01333	kg/L B100
	Pure methanol	0.04171	kg/L B100
Transport	Diesel (truck FFB round-trip)	120.00000	Km
	Diesel (truck palm stearin round-trip)	200.00000	Km

4.2 การคำนวณ

4.2.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ตามพิธีสารเกียวโตระบุถึงก๊าซเรือนกระจกหลัก 6 ชนิดคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซัลเฟอร์เฮ็กซะฟลูออไรด์ (SF_6) เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC's) และไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC's) ซึ่งการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำการประเมินจากก๊าซ 3 ชนิดเท่านั้นคือ CO_2 CH_4 และ N_2O เนื่องจากเป็นชนิดที่สามารถพบได้ทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีหลักการคำนวณอ้างอิงจากแนวทางการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ขององค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก (TGO., 2011) คำนวณจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบ อุปโภคที่ใช้ในการผลิต และการปล่อยมลภาวะ แสดงดังสมการที่ 4-1 อุปโภคที่ใช้ในการผลิตยกตัวอย่างเช่น น้ำมันเตา น้ำ ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานอย่างน้ำมันเตาหรือน้ำมันดีเซลเมื่อเผาจะมีการปล่อยก๊าซโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงรวมการเผาในส่วนของอุปโภคด้วย ดังสมการที่ 4-2 การปล่อยมลภาวะเช่น การปล่อยน้ำเสีย ซึ่งต้องทำการบำบัด ในกรณีเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศก็จะก่อก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง กรณีเป็นระบบบำบัดแบบใช้อากาศก็ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศแก่ระบบ เพราะฉะนั้นการปล่อยมลภาวะนี้จะเป็นการรวมผลของปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนสู่ชั้นบรรยากาศ และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน ซึ่งการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละส่วนคำนวณจากปริมาณสาร (Activity data) คูณกับค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor) ดังสมการที่ 4-3 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สรุปดังตารางที่ 4-18 ซึ่งเมื่อทำการคำนวณตามสมการจะได้ผลดังตารางที่ 4-22 และ 4-23 ในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรไบโอดีเซล ($kgCO_2/L$) ในส่วนของเสียที่เกิดขึ้นหากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ โดยไม่ต้องมีการส่งของเสียไปกำจัดหรือมีการจัดการสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติม ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของของเสียนั้นจะมีค่าเป็น 0 $kgCO_2/kg$ ยกตัวอย่างเช่น การนำของเสียไปผ่านการรีไซเคิล การนำไปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่น การนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน เป็นต้น

$$E_{GHG,product} = E_{GHG,raw\ material\ acquisition} + E_{GHG,production} + E_{GHG,transportation} + E_{GHG,pollution} \quad (4\text{-}1)$$

$$E_{production} = E_{fuel,acquisition} + E_{fuel,combustion} + E_{water} + E_{electricity} \quad (4\text{-}2)$$

$$\text{GHG emissions } (kgCO_2/FU) = \text{Activity data} \times \text{Emission factor} \quad (4\text{-}3)$$

ตารางที่ 4-18 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor)

Materials	EF		source	Remark
N fertilizer	2.6	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Japan CF, ปุ๋ยไนโตรเจน (Fertilizer N) – การผลิต
P_2O_5 fertilizer	0.252	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Japan CF, ปุ๋ยฟอสฟอรัส (Fertilizer P) – การผลิต
K_2O fertilizer	0.16	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Japan CF, ปุ๋ยโปแตสเซียม (Fertilizer K) –การผลิต
Glyphosate	16	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.0
Paraquat	8.09	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.1
Kaolin	0.2167	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007GWP 100a,Kaolin at plant
Polyaluminium chloride	0.6	$kgCO_2/kg$	(Winnipeg, 2013)	Aluminium chloride, $AlCl_3$
Anionic polymer	5.35	$kgCO_2/kg$	(Musikavong C. และคณะ, 2012)	Ecoinvent 2.0
HCl	0.4094	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007GWP 100a, HCL 100%,from Mannheim process at plant
NaOH	1.1148	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007GWP 100a,Sodium hydroxide, 50% in H2O, membrane cell at plant
MeOH	0.7212	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a

Materials	EF	unit	source	Remark
$NaOCH_3$	4.88	$kgCO_2/kg$	(ADEME, 2009)	ECOINVENT, Sodium methoxide, at plant/GLO S
Refeed distillation waste	1.21	$kgCO_2/kg$	Calculation	
Kerobit	0.7344	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database, Benzene
NaCl	0.1933	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a, Sodium chloride powder at plant
H_3PO_4	1.4067	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a, industrial grade, 85% in H_2O, at plant
Activated carbon	2.46	$kgCO_2/kg$	(Winnipeg, 2013)	AC mineral reac
CPO (Crude palm oil)	871	$kgCO_2/t$	(TGO., 2013., Nov)	Average value,โครงการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของประเทศไทย
Bleaching earth (Sodium based)	0.4954	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Ecoinvent)	Bentonite, Guideline for PCR “Ceramic Roof Tile”
H_2SO_4	0.1219	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Sulphuric acid, liquid, at plant,Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a
MeOH (recycle)	1.5548	$kgCO_2/kg$	Calculation	
Citric acid	1.58	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2011)	ข้อมูลทดแทนจากค่าของ Acetic acid, 98% in H2O, at plant/kg/RER, ECOINVENT 2.0
Water (Ground water)	0	$kgCO_2/kg$		From natural resource
Utility for production	**EF**	**unit**	**source**	**Remark**
Diesel	0.3282	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database
Diesel (combustion)	3.1972	$kgCO_2/kg$	Calculation	IPCC 2006
Electricity	0.6093	$kgCO_2$/ kWh	(TGO., 2013., Nov)	Thai national databaseThai Electricity, grid mix 2009
Tap water	0.0003	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	TGO, Ecoinvent 2.0, IPCC 2007 GWP 100a
Fuel oil	0.3057	$kgCO_2/kg$	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database
Fuel oil (combustion)	3.1372	$kgCO_2/kg$	Calculation	IPCC 2006

Transport	EF	unit	source	Remark
รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ	0.053	$kgCO_2$/ tkm	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database, รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ Fill Load 16 ตัน วงปกติ 100% Loading
รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ	0.5863	$kgCO_2$/ km	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database, รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ Fill Load 16 ตัน วงปกติ 0% Loading
รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ	0.0966	$kgCO_2$/ tkm	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 16 ตัน วงปกติ 50% Loading
เรือบรรทุก container	0.0107	$kgCO_2$/ tkm	(TGO., 2013., Nov)	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a, transoceanic freight ship (เรือขนส่งข้ามมหาสมุทร)
รถกระบะบรรทุกพ่วง 22 ล้อ	0.0457	$kgCO_2$/ tkm	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุกพ่วง 22 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 32 ตัน วงปกติ 100% Loading
รถกระบะบรรทุกพ่วง 22 ล้อ	1.0142	$kgCO_2$/ km	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุกพ่วง 22 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 32 ตัน วงปกติ 0% Loading
รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ	0.0526	$kgCO_2$/ tkm	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 32 ตัน วงปกติ 75% Loading
รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ	0.8801	$kgCO_2$/ km	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 32 ตัน วงปกติ 0% Loading
รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก	0.2681	$kgCO_2$/ tkm	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7 ตัน วงปกติ 50% Loading
รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก	0.3111	$kgCO_2$/ km	(TGO., 2013., Nov)	Thai national database,รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7 ตัน วงปกติ 0% Loading
Waste	**EF**	**unit**	**source**	**Remark**
Wastewater (palm oil mill effluent; POME)	0.51	$kgCO_2$/ kgCPO	(ISCC., 2011)	BLE 2010 Guideline sustainable biomass production, treatment in open ponds
Wastewater (anaerobic)	20	$kgCO_2$/ kgCOD	(TGO., 2013., April)	Open pond depth more than 2 m

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.2 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

ปริมาณการใช้พลังงานคำนวณจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ อุปโภคที่ใช้ในการผลิต และการขนส่ง โดยการคำนวณก็เช่นเดียวกับการคำนวณก๊าซเรือนกระจกคือ ปริมาณสาร (Activity data) คูณกับค่าการใช้พลังงาน (Energy factor) ซึ่งสามารถรวบรวมค่าการใช้พลังงานที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังตารางที่ 4-19 ส่วนการคำนวณปริมาณพลังงานที่ได้จากสารขาออกจะคำนวณจากค่าความร้อนที่ได้จากผลิตภัณฑ์นั้นๆ คือปริมาณสาร (Activity data) คูณกับค่าความร้อน (Calorific value, CV หรือ Low heating value, LHV) โดยค่าความร้อนของสารขาออกแสดงดังตารางที่ 4-20 เมื่อได้ทั้งปริมาณการใช้พลังงานและปริมาณที่ได้จะนำมาหาค่าพลังงานสุทธิ (Net Energy Balance, NEB) และค่าอัตราส่วนทางพลังงาน (Net Energy Ratio, NER) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 4-4 และ 4-5 ตามลำดับ เพื่อให้ง่ายต่อการนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ โดยผลปริมาณการใช้พลังงานแสดงดังตารางที่ 4-22 และ 4-23 ในหน่วยของ เมกะจูลต่อลิตรไบโอดีเซล (MJ/L)

Net energy balance (NEB) = Energy output – Energy input (4-4)

$$\text{Net energy ratio (NER)} = \frac{\text{Energy output}}{\text{Energy input}} \quad (4\text{-}5)$$

ตารางที่ 4-19 ค่าการใช้พลังงาน (Energy factor)

Materials	Energy factor	unit	source	Remark
Seed	0.99	MJ/kg	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	
N fertilizer	57.47	MJ/kg	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	
P_2O_5 fertilizer	7.04	MJ/kg	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	
K_2O fertilizer	6.85	MJ/kg	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	
Glyphosate	452.5	MJ/kg	(Malakul P. และคณะ, 2010)	
Paraquat	458.4	MJ/kg	(Malakul P. และคณะ, 2010)	
HCl	2.5	MJ/kg	(James A. Kent., 2012)	Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, Page 186
NaOH	19.7	MJ/kg	(Malakul P. และคณะ, 2010)	
MeOH	38	MJ/kg	(Malakul P. และคณะ, 2010)	
$NaOCH_3$	31.7	MJ/kg	(Pradhan. A และคณะ, 2011)	ENERGY LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF SOYBEAN BIODIESEL REVISITED, Page 1032

Materials	Energy factor	unit	source	Remark
Refeed distillation waste	2.36	MJ/kg	Calculation	
Kerobit	54.3	MJ/kg	(Patel M. และคณะ, 1998)	Benzene, Page 76
NaCl	1.3	MJ/kg	(James A. Kent., 2012)	Page 186
H_3PO_4	5.7	MJ/kg	(McLaughlin S. P., 1999)	Estimated Energy to Produce Common Agronomic
Activated carbon	47.9	MJ/kg	(Norgate T. และคณะ, 2011)	Page 5, LCA results for charcoal production from Mallee eucalypts
CPO	6.81134	MJ/kg	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	
Bleaching earth	579	MJ/t	(Painesis M., 2011)	Page 14,KEY PERFORMANCE INDICATORS
H_2SO_4	0.12	MJ/kg	(Johnson M. C. และคณะ, 2013)	Electricity and natural gas demand
MeOH (recycle)	7.482860	MJ/kg	Calculation	
Citric acid	97	MJ/kg	(Patel M. และคณะ, 2006)	maize starch,cradle to gate,process-Tpc, Page 159
Utility for production	**Energy factor**	**unit**	**source**	**Remark**
Diesel	43.1	MJ/kg	(Malakul P. และคณะ, 2010)	
Tap Water	0.01	MJ/L	(Pacca S. และคณะ, 2010)	
Electricity	9.9	MJ/kWh	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	
Fuel oil	52.5	MJ/kg	(Malakul P. และคณะ, 2010)	
Ground water	0	MJ/L	Groundwater	Nature

ตารางที่ 4-20 ค่าความร้อนของสารขาออก (Energy content)

Material Outputs	Energy content (MJ/kg)	Source	Remark
Palm kernel	17	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	Calorific value
Fiber	11.4	(Malakul P. และคณะ, 2010)	Low heating value
Shell	18.46	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	Calorific value
Empty fruit bunch	7.24	(Malakul P. และคณะ, 2010)	Low heating value
Biodiesel	38.07	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	Calorific value
Pure glycerol	19	(Gheewala S.H. และคณะ, 2009)	Calorific value
Pure methanol	20.094	(Biomass Energy Data Book., 2011)	Low heating value

4.2.3 การวิเคราะห์การใช้น้ำ

ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงการคำนวณจากคู่มือการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (The water footprint assessment manual) ของเครือข่ายวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint Network) เขียนโดย (Hoekstra A.Y.Chapagain A.K. และคณะ, 2011) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นตัวชี้วัดปริมาณน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักร รอยเท้าน้ำหรือวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เป็นผลรวมของกรีนวอเตอร์ บลูวอเตอร์ และเกรย์วอเตอร์ กรีนวอเตอร์ (Green water) หมายถึง ปริมาณน้ำฝนที่ยังไม่กลายเป็นน้ำท่า บลูวอเตอร์ (Blue water) หมายถึง น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ส่วนเกรย์วอเตอร์ (Grey water) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมน้ำเสียให้ผ่านมาตรฐานของน้ำทิ้งจากโรงงาน หรือปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาณสาร (Activity data) คูณกับค่าการใช้น้ำ (Water factor) ซึ่งค่าการใช้น้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4-21 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในประเทศไทยนั้น ยังมีการวิจัยจำนวนน้อย โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการเพาะปลูกพืชต่างๆ ทำให้ค่าการใช้น้ำจึงอ้างอิงจากงานวิจัยจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการปลูกปาล์มน้ำมันในแถบภาคใต้ของประเทศไทยใช้น้ำกรีนวอเตอร์ บลูวอเตอร์ และเกรย์วอเตอร์ โดยเฉลี่ยคือ 750 138 และ 511 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์ม ตามลำดับ สำหรับโรงงานผลิตไบโอดีเซลทั้ง 2 โรงงานจะมีการวิเคราะห์ปริมาณการใช้น้ำจากการเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ เนื่องจากสามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้โดยละเอียด การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ตลอดวัฏจักรของการผลิตไบโอดีเซลแสดงผลในหน่วยลิตรต่อลิตรไบโอดีเซล (L/L B100) ดังตารางที่ 4-22 และ 4-23

ตารางที่ 4-21 ค่าการใช้น้ำ (Water factor)

Materials	Water factor			unit	source	Remark
	Green	Blue	Grey			
Fresh fruit bunch	750	138	511	m^3/t	(ลักขณา เจริญสุข และคณะ, 2555)	Southern Thailand, average
HCl	0	0.1	0	m^3/t	(Unger K. และคณะ, 2013)	
NaOH	0	2.86	0	m^3/t	(Unger K. และคณะ, 2013)	
MeOH	0	20	0	m^3/t	(Yang C.-J. และคณะ, 2012)	Page 3
$NaOCH_3$	0	100	0	L/L chemicals	(SDWF., 2010)	Page 2
Kerobit	0	100	0	L/L chemicals	(SDWF., 2010)	Page 2
NaCl	0	2.27	0	m^3/t	(Unger K. และคณะ, 2013)	
H_3PO_4	0	23.5	0	m^3/t	(Unger K. และคณะ, 2013)	
Activated carbon	0	100	0	L/L chemicals	(SDWF., 2010)	Page 2
CPO	0	1.3	0	m^3/tonFFB	INDUSTRIAL ECOSYSTEMS IN THE CRUDE PALM OIL INDUSTRY IN THAILAND	Page 4, Gate to Gate
Bleaching earth	0	100	0	L/L chemicals	(SDWF., 2010)	Page 2
H_2SO_4	0	2.68	0	m^3/t	(Unger K. และคณะ, 2013)	Tata Industrial Water Footprint Assessment
Citric acid	0	100	0	L/L chemicals	(SDWF., 2010)	Page 2
Utility	**Water factor**			**unit**	**source**	**Remark**
	Green	**Blue**	**Grey**			
Diesel	0	18.8	18.8	L/L Diesel	(Francke I.C.M. และคณะ, 2013)	Diesel oil from crude oil
Tap water	0	3.63	0	L/1.5L	(Botto S., 2009)	Tap water footprint
Electricity	7.8	105	0.5	L/kWh	(Francke I.C.M. และคณะ, 2013)	average from grid
Fuel oil	0	18.8	18.8	L/L fuel oil	(Francke I.C.M. และคณะ, 2013)	Heavy oil from crude oil

ตารางที่ 4-22 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process)

		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Oil palm cultivation	Seed	0.16418	kg/L B100		0.16254	
	N fertilizer	0.13844	kg/L B100	0.35994	7.95596	
	P_2O_5 fertilizer	0.03504	kg/L B100	0.00883	0.24669	
	K_2O fertilizer	0.26889	kg/L B100	0.04302	1.84192	
	Glyphosate	0.00467	kg/L B100	0.07465	2.11110	
	Paraquat	0.00168	kg/L B100	0.01357	0.76907	
	Diesel	0.00503	kg/L B100	0.00165	0.21701	
	Diesel (combustion)	0.00503	kg/L B100	0.01610		
	Diesel (truck fertilizers one-way)	865.000	km	0.02028	0.52551	
	Total			**0.53804**	**13.82979**	**23561.8719**
Palm oil mill	Kaolin (separation PK from shell)	0.03472	kg/L B100	0.00752		
	Polyaluminium chloride (water treatment)	0.00098	kg/L B100	0.00059		
	Anionic polymer (water treatment)	0.00146	kg/L B100	0.00782		
	HCl (water treatment)	0.00456	kg/L B100	0.00187	0.01141	0.00046
	NaOH (water treatment)	0.00427	kg/L B100	0.00476	0.08404	0.01220
	Electricity (CPO extraction)	0.17073	kWh/LB100	0.10402	1.69021	19.34353
	Water	0.01881	m3/L B100	0.00564	0.18809	45.51765
	Diesel	0.00880	kg/L B100	0.00289	0.37936	0.39874
	Diesel (combustion)	0.00880	kg/L B100	0.02814		
	Electricity (CPO refining)	0.00405	kWh/LB100	0.00247	0.04008	0.45873
	Wastewater	0.01489	m3/L B100	1.52142		
	Total			**1.68715**	**2.39319**	**65.73130**

		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Biodiesel Production Plant (Veerasuwan factory)	**Reaction process**					
	MeOH	0.18659	kg/L B100	0.13457	7.09027	3.73172
	$NaOCH_3$	0.00589	kg/L B100	0.02875	0.18675	0.60734
	Refeed distillation waste	0.07688	kg/L B100	0.09304	0.18178	
	Electricity	0.00685	kWh/LB100	0.00418	0.06785	0.77647
	Fuel oil	0.00707	L/L B100	0.00212	0.36372	0.26581
	Fuel oil (combustion)	0.00707	L/L B100	0.02173		
	Diesel (truck MeOH round-trip)	160.00	km	0.00134	0.04100	0.04309
	Diesel ($NaOCH_3$ one-way ship & two-way truck)	4180.00	km	0.00030	0.03382	0.03555
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.00	km	0.00001	0.00023	0.00024
	Total			**0.28602**	**7.96541**	**5.46021**
	Biodiesel purification process					
	Kerobit	2.1×10^{-9}	kg/L B100	1.56×10^{-9}	1.15×10^{-7}	2.26×10^{-7}
	NaCl (water treatment)	0.00202	L/L B100	0.00004	0.00263	0.00046
	Electricity	0.01582	kWh/LB100	0.00964	0.15657	1.79184
	Water	0.00141	kg/L B100	0.00000042	0.00001	0.00342
	Fuel oil	0.03299	L/L B100	0.00988	1.69737	1.24045
	Fuel oil (combustion)	0.03299	L/L B100	0.10143		
	Diesel (kerobit one-way ship & two-way truck)	17441.8	km	4.07×10^{-10}	5.08×10^{-8}	5.34×10^{-8}
	Diesel (truck NaCl round-trip)	20.0000	km	0.00000018	0.00001	0.00001
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.0000	km	0.00003	0.00107	0.00112
	Total			**0.12102**	**1.85765**	**3.03730**

		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Biodiesel Production Plant (Veerasuwan factory)	**Glycerol purification process**					
	H_3PO_4 (neutralization)	0.00342	kg/L B100	0.00481	0.01948	0.08030
	Activated carbon	0.00020	kg/L B100	0.00049	0.00959	0.01002
	NaCl (water treatment)	0.00202	L/L B100	0.00004	0.00263	0.00046
	Electricity	0.02003	kWh/LB100	0.01221	0.19832	2.26967
	Water	0.00245	kg/L B100	0.00000074	0.00002	0.00594
	Fuel oil	0.01885	L/L B100	0.00565	0.96993	0.70883
	Fuel oil (combustion)	0.01885	L/L B100	0.05796		
	Diesel (H_3PO_4 one-way ship & two-way truck)	4180.00	km	0.00017	0.01962	0.02062
	Diesel (truck activated carbon round-trip)	160.000	km	0.00000144	0.00004	0.00005
	Diesel (truck NaCl round-trip)	20.0000	km	0.00000018	0.00001	0.00001
	Diesel (fuel oil round-trip)	24.0000	km	0.00002	0.00061	0.00064
	Total			**0.08134**	**1.22024**	**3.09652**
	Methanol purification process					
	NaCl (water treatment)	0.00067	L/L B100	0.00001	0.00088	0.00015
	Electricity	0.00316	kWh/LB100	0.00193	0.03131	0.35837
	Water	0.00047	kg/L B100	0.00000014	0.0000047	0.00114
	Fuel oil	0.00766	L/L B100	0.00229	0.39403	0.28796
	Fuel oil (combustion)	0.00766	L/L B100	0.02355		
	Diesel (truck NaCl round-trip)	20.0000	km	6.04×10^{-8}	0.0000019	0.00000194
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	24.0000	km	0.00001	0.00025	0.00026
	Total			**0.02779**	**0.42648**	**0.64789**
Transport	Diesel (truck FFB round-trip)	120.000	km	0.09059	2.77558	2.91734
	Diesel (truck palm stearin round-trip)	20.0000	km	0.00078	0.02376	0.02498
	Total			**0.09136**	**2.79935**	**2.94231**
	Overall stages summation			**2.83273**	**30.49212**	**23642.7875**

ตารางที่ 4-23 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำของการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process)

		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Oil palm cultivation	Seed	0.07467	kg/L B100		0.07392	
	N fertilizer	0.06296	kg/L B100	0.16370	3.61846	
	P_2O_5 fertilizer	0.01594	kg/L B100	0.00402	0.11220	
	K_2O fertilizer	0.12230	kg/L B100	0.01957	0.83772	
	Glyphosate	0.00212	kg/L B100	0.03395	0.96015	
	Paraquat	0.00076	kg/L B100	0.00617	0.34978	
	Diesel	0.00229	kg/L B100	0.00075	0.09870	
	Diesel (combustion)	0.00229	kg/L B100	0.00732		
	Diesel (truck fertilizers one-way)	865.000	km	0.00922	0.23901	
	Total			**0.24471**	**6.28995**	**10716.2065**
Palm oil mill	Kaolin (separation PK from shell)	0.01579	kg/L B100	0.00342		
	Polyaluminium chloride (water treatment)	0.00045	kg/L B100	0.00027		
	Anionic polymer (water treatment)	0.00066	kg/L B100	0.00356		
	HCl (water treatment)	0.00208	kg/L B100	0.00085	0.00519	
	NaOH (water treatment)	0.00194	kg/L B100	0.00216	0.03822	
	Electricity (CPO extraction)	0.07765	kWh/LB100	0.04731	0.76873	8.79766
	Water	0.00855	m3/L B100	0.00257	0.08555	20.81601
	Diesel	0.00400	kg/L B100	0.00131	0.17254	0.18135
	Diesel (combustion)	0.00400	kg/L B100	0.01280		
	Electricity (CPO refining)	0.00184	kWh/LB100	0.00112	0.01823	0.20863
	Wastewater	0.00677	m3/L B100	0.69196		
	Total			**0.76733**	**1.08845**	**30.00365**
Biodiesel plant	**CPO Pretreatment**					
	CPO (Crude palm oil)	0.48090	kg/L B100	0.41887	3.27560	3.74357
	H_3PO_4	0.00131	kg/L B100	0.00184	0.00748	0.03082
	Bleaching earth (Sodium based)	0.01312	kg/L B100	0.00650	0.00759	0.89222
	H_2SO_4	0.00044	kg/L B100	0.00005	0.00007	0.00117
	MeOH	0.04372	kg/L B100	0.03153	1.66131	0.87437

		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Biodiesel Production Plant (Bangchak biofuel factory)	Electricity	0.01194	kWh/LB100	0.00728	0.11825	1.35331
	Water (Ground water)	0.16667	kg/L B100	0.00000		0.16667
	Electricity for pumping	0.00239	kWh/LB100	0.00145	0.02363	0.27041
	Fuel oil	0.00972	kg/L B100	0.00297	0.51042	0.37302
	Fuel oil (combustion)	0.00972	kg/L B100	0.03050		
	Wastewater (anaerobic & aerobic)	0.16667	kg/L B100	0.01365	0.00520	0.05946
	Diesel (truck CPO round-trip)	1000.00	km	0.01912	0.35224	0.37023
	Diesel (truck H_3PO_4 round-trip)	200.000	km	0.00009	0.00576	0.00606
	Diesel (truck bleaching earth round-trip)	200.000	km	0.00013	0.00288	0.00303
	Diesel (truck H_2SO_4 round-trip)	200.000	km	0.02687	0.00192	1.81749
	Diesel (truck methanol round-trip)	200.000	km	0.00035	0.00640	0.00673
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.000	km	0.00008	0.00142	0.00150
	Total			**0.56128**	**5.98017**	**9.97005**
	Reaction Process					
	$NaOCH_3$	0.01924	kg/L B100	0.09387	0.60979	1.98311
	MeOH (new)	0.04468	kg/L B100	0.03222	1.69786	0.89361
	MeOH (from methanol purification process)	0.04171	kg/L B100	0.06485	0.31209	
	Electricity	0.00065	kWh/L B100	0.00039	0.00639	0.07317
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100	0.00144	0.24792	0.18118
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100	0.01481		
	Diesel (truck $NaOCH_3$ round-trip)	200.000	km	0.00019	0.00423	0.00444
	Diesel (truck methanol round-trip)	200.000	km	0.00036	0.00655	0.00688
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.000	km	0.00004	0.00069	0.00073
	Total			**0.20817**	**2.88551**	**3.14312**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Biodiesel Production Plant (Bangchak biofuel factory)	**Biodiesel Purification Process**					
	Citric acid	0.00069	kg/L B100	0.00110	0.06736	0.04171
	Electricity	0.00065	kWh/LB100	0.00039	0.00639	0.07317
	Water (Ground water)	0.03333	kg/L B100	0.00000		0.03333
	Electricity for pumping station	0.00048	kWh/L B100	0.00029	0.00473	0.05408
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100	0.00144	0.24792	0.18118
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100	0.01481		
	Wastewater (anaerobic & aerobic)	0.13333	kg/L B100	0.01092	0.00416	0.04757
	Diesel (truck citric acid round-trip)	200.000	km	0.00005	0.00305	0.00321
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.000	km	0.00004	0.00069	0.00073
	Total			**0.02905**	**0.33430**	**0.43498**
	Glycerol Pretreatment Process					
	HCl	0.00979	kg/L B100	0.00401	0.02448	0.00098
	NaOH	0.00070	kg/L B100	0.00078	0.01378	0.00200
	Electricity	0.00065	kWh/LB100	0.00039	0.00639	0.07317
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100	0.00144	0.24792	0.18118
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100	0.01481		
	Diesel (truck HCl round-trip)	200.000	km	0.00029	0.01435	0.01508
	Diesel (truck NaOH round-trip)	200.000	km	0.00004	0.00307	0.00323
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.000	km	0.00004	0.00069	0.00073
	Total			**0.02180**	**0.31068**	**0.27637**

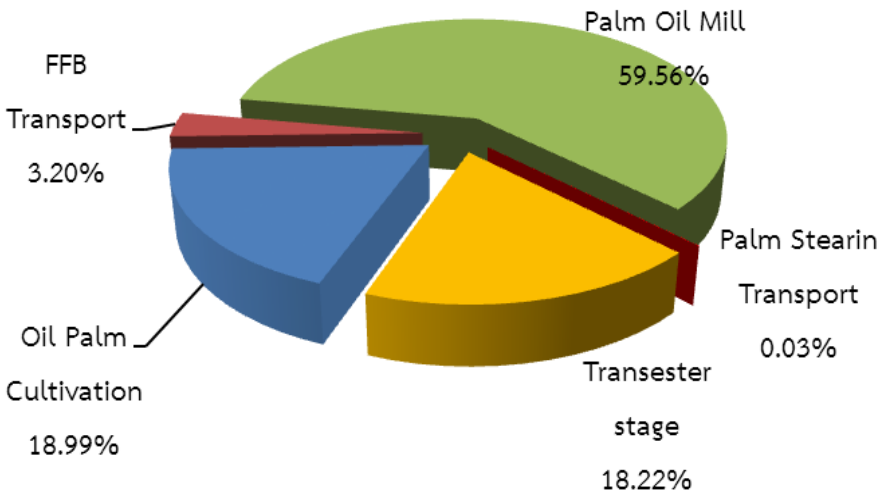
		Amount	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)	Energy balance (MJ/L)	Water balance (L/L)
Biodiesel Plant	**Methanol Purification Process**					
	Electricity	0.00065	kWh/LB100	0.00039	0.00639	0.07317
	Fuel oil	0.00472	kg/L B100	0.00144	0.24792	0.18118
	Fuel oil (combustion)	0.00472	kg/L B100	0.01481		
	Wastewater (anaerobic & aerobic)	0.01333	kg/L B100	0.00109	0.00042	0.00476
	Diesel (truck fuel oil round-trip)	200.000	km	0.00004	0.00069	0.00073
	Total			**0.01778**	**0.25542**	**0.25984**
Transport	Diesel (truck FFB round-trip)	120.000	km	0.04120	1.26237	2.91734
	Diesel (truck palm stearin round-trip)	200.000	km	0.00313	0.10807	0.24976
	Total			**0.04433**	**1.37044**	**3.16710**
	Overall stages summation			**1.89445**	**18.51492**	**10763.4616**

4.3 การประเมินผลและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG emissions)

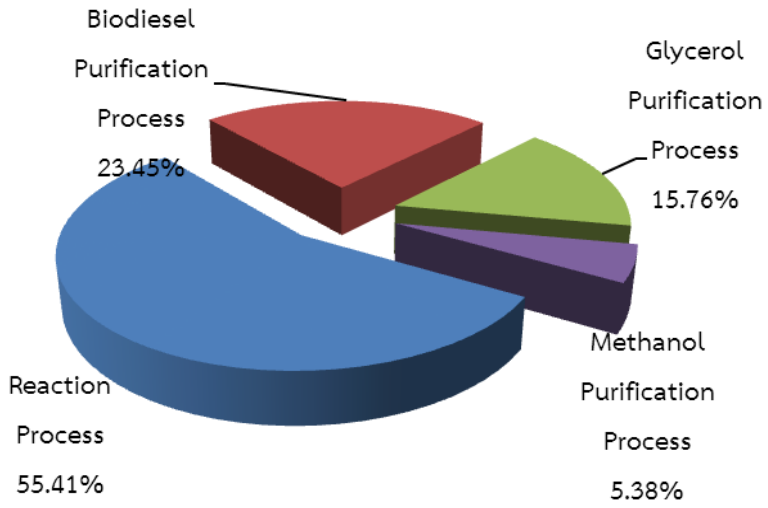
4.3.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process)

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิต (GHG emissions) ซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้งคือ 2.83 $kgCO_2/L$ โดยขั้นตอนการปลูกปาล์มปล่อย 0.54 $kgCO_2/L$ การผลิตน้ำมันปาล์มปล่อย 1.69 $kgCO_2/L$ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลปล่อย 0.52 $kgCO_2/L$ และการขนส่งปล่อย 0.09 $kgCO_2/L$ ดังตารางที่ 4-22 และภาพที่ 4-5 พบว่ากระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าร้อยละ 50 รองลงมาเป็นการปลูกปาล์ม กระบวนการผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มก่อน้ำเสีย ซึ่งใช้วิธีการบำบัดแบบบ่อไร้อากาศโดยไม่การกักเก็บก๊าซชีวภาพ ทำให้มีก๊าซมีเทนปล่อยสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก การปลูกปาล์มปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตยาปราบวัชพืชมีค่าสูงถึง 8.09 $kgCO_2/kg$

เมื่อพิจารณาเฉพาะโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง จากตารางที่ 4-22 และภาพที่ 4-6 พบว่ามีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.52 $kgCO_2/L$ โดยกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.29 $kgCO_2/L$ หรือคิดเทียบเป็นร้อยละมากถึง 55.41 เนื่องจากเป็นแหล่งรวมสารขาเข้า ทำให้มีค่าการได้มาซึ่งวัตถุดิบและการขนส่งวัตถุดิบสู่โรงงานสูง รองลงมาเป็นกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ 0.12 $kgCO_2/L$ กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ 0.08 $kgCO_2/L$ ซึ่งกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่ากระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ทั้งๆ ที่จากภาพที่ 4-1 กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ประกอบด้วยขั้นตอนที่ซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้น้ำมันเตาในปริมาณที่มากกว่า จึงเป็นเหตุให้การได้มาซึ่งน้ำมันเตา และการเผาไหม้ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่า ส่วนในกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.03 $kgCO_2/L$ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเพราะ ไม่มีการใช้สารตั้งต้นจากภายนอกโรงงาน และมีหอกลั่นเพียงแค่ 1 หอเท่านั้น จึงใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ



ภาพที่ 4-5 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง

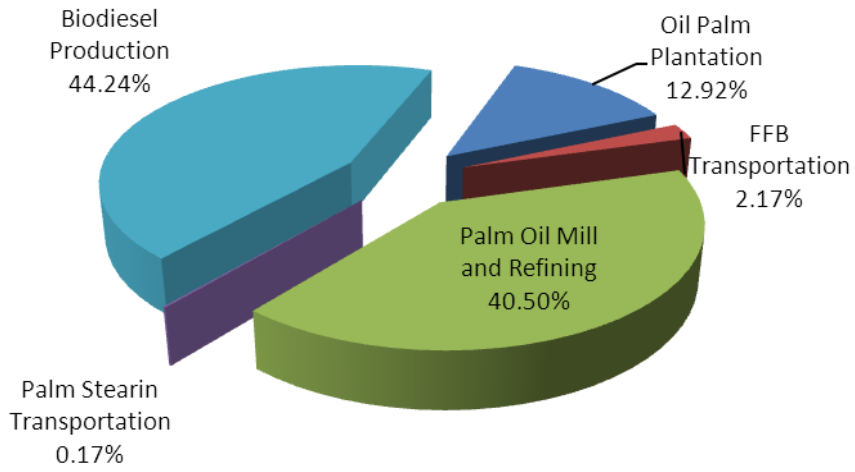


ภาพที่ 4-6 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง

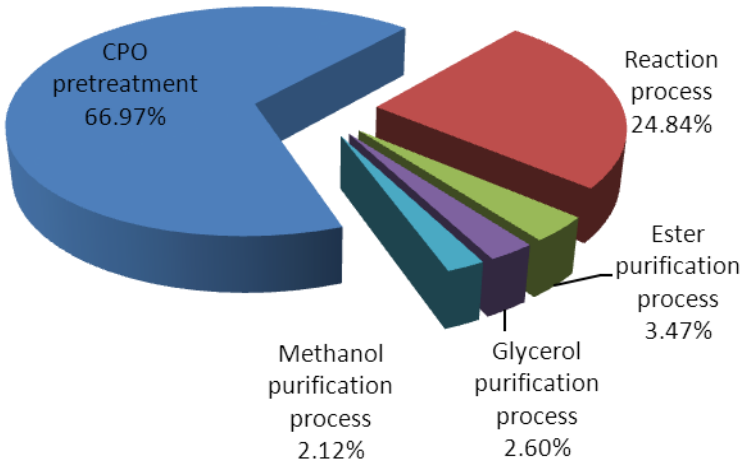
4.3.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก จากการคำนวณพบว่าปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1.89 kgCO_2/L ดังตารางที่ 4-23 และภาพที่ 4-7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลปล่อยมากถึงร้อยละ 44.24 รองลงมาคือ การผลิตน้ำมันปาล์ม การปลูกปาล์ม และการขนส่งตามลำดับ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีการใช้ทั้งน้ำมันปาล์มดิบ และปาล์มสเตียรีน ในอัตราส่วนร้อยละ 55 ต่อ 45 ตามลำดับ ซึ่งในส่วนของน้ำมันปาล์มดิบต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน และปาล์มสเตียรีนที่นำไปใช้ก็เป็นเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น ส่งผลให้ในขั้นตอนการผลิตปาล์ม สเตียรีนหรือการผลิตน้ำมันปาล์ม และขั้นตอนการปลูกปาล์มนั้น มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่น้อยลง เพราะเป็นการอ้างอิงข้อมูลเฉพาะปริมาณของปาล์มสเตียรีนที่ใช้เท่านั้น อีกทั้งในขั้นตอนผลิตไบโอดีเซลนี้ใช้วิธีการล้างด้วยน้ำในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ จึงทำให้มีน้ำเสียเกิดขึ้น และต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทางโรงงานไม่มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพจากการบำบัดแบบไร้อากาศ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้โรงงานผลิตไบโอดีเซลปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าขั้นตอนอื่นๆ และเช่นเดียวกับขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มก็มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าการปลูกปาล์มเนื่องจากมีระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งไม่มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพเช่นกัน จึงทำให้ก๊าซมีเทนปล่อยสู่บรรยากาศโดยตรง ซึ่งส่งผลต่อการเกิดสภาวะโลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 25 เท่า

เมื่อพิจารณาเฉพาะโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.84 $kgCO_2/L$ ซึ่งจากตารางที่ 4-23 และภาพที่ 4-8 พบว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากถึงร้อยละ 66.97 เพราะมีการใช้พลังงาน การใช้วัตถุดิบในการผลิตสูง รวมถึงการก่อน้ำเสียจำนวนมาก รองลงมาคือกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันร้อยละ 24.84 เนื่องจากเป็นแหล่งรวมวัตถุดิบขาเข้าในการผลิต กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 3.47 เมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำมันปาล์ม และกระบวนการเกิดปฏิกิริยาถือว่าปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าถึง 19 และ 7 เท่า ตามลำดับ เพราะกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ ซึ่งใช้พลังงานน้อย รองลงมาคือ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 2.60 เป็นปริมาณน้อยเพราะ ในกระบวนการนี้เป็นเพียงการปรับปรุงขั้นต้นเพื่อผลิตกลีเซอรอลดิบ ไม่มีระบบการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ส่วนกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด เนื่องจากไม่มีการใช้วัตถุดิบจากภายนอกโรงงาน มีเพียงหอกลั่น 1 หอ และปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัดเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 4-7 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก



ภาพที่ 4-8 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก

4.3.3 เปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

ข้อมูลที่รวบรวมได้จาก 2 โรงงานคือ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง และโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก เนื่องจากมีกระบวนการผลิตภายในโรงงานที่แตกต่างกัน แต่มีวัตถุดิบหรือสารขาเข้าที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นวัตถุดิบหลัก ซึ่งข้อแตกต่างของทั้ง 2 โรงงานแสดงดังตารางที่ 4-24 โรงงานผลิตไบโอ-ดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้ทั้งน้ำมันปาล์มดิบ และปาล์มสเตียรีน ในขณะที่โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้ปาล์มสเตียรีนเพียงอย่างเดียว เมื่อวิเคราะห์ผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การปลูกปาล์มจนมาถึงการผลิตไบโอดีเซลพบว่า ถ้าโรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้เทคโนโลยีแบบแห้งจะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิต 2.83 kgCO_2/L แต่ถ้าโรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้เทคโนโลยีแบบเปียกจะปล่อย 1.89 kgCO_2/L เพราะทั้ง 2 โรงงานมีข้อแตกต่างกันโดยเฉพาะชนิดของปาล์มที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ถ้าใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบจะต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบประมาณ 3.45 กิโลกรัม เพื่อผลิตปาล์มสเตียรีน 1 กิโลกรัม นั่นหมายความว่าถ้าโรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบปริมาณหนึ่งโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มก็จะใช้ผลิตน้ำมันปาล์มดิบเท่ากับจำนวนนั้น แต่ถ้าเปลี่ยนไปใช้ปาล์มสเตียรีนในขณะที่กำลังการผลิตสามารถผลิตไบโอ-ดีเซลได้ปริมาณเท่าเดิม โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มต้องผลิตน้ำมันปาล์มดิบเพิ่ม 3.45 เท่า จึงทำให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า

ตารางที่ 4-24 ข้อแตกต่างระหว่างโรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีเทคโนโลยีการผลิตที่ต่างกัน

โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process)	**โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process)**
ปาล์มสเตียรีน	น้ำมันปาล์มดิบ + ปาล์มสเตียรีน
น้ำประปา	น้ำบาดาล
ไม่มีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ	มีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ
กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์	กระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอล
กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้วิธีการกลั่น	กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ
ของเสียจากการกลั่นทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ นำไปบำบัดต่อได้ไบโอดีเซลใช้ภายในโรงงาน	ของเสียจากการกลั่นทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ เป็นน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป
ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย	มีระบบบำบัดน้ำเสีย
มีการนำของเสียจากการกลั่นไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์กลับไปใช้ใหม่	มีการนำเมทานอลที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์กลับไปใช้ใหม่

ในขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่ง ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะขึ้นกับชนิดน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ถ้าใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบหลักจะทำให้โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มสิ้นสุดกระบวนการผลิตที่เป็นน้ำมันปาล์มดิบเท่านั้น แต่ถ้าใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบหลักส่งผลให้ภายในโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มต้องประกอบไปด้วย 2 กระบวนการผลิตคือ การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ และการผลิตปาล์มสเตียรีนจากน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งการผลิตปาล์มสเตียรีน 1 กิโลกรัมต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบถึง 3.45 กิโลกรัม ดังนั้นปริมาณทะลายปาล์มที่ต้องใช้เพื่อผลิตปาล์มสเตียรีนจึงมากกว่าทะลายปาล์มที่ต้องใช้เพื่อผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ทำให้ส่งผลต่อขั้นตอนการปลูกปาล์มที่ต้องผลิตทะลายปาล์ม รวมถึงต้องใช้วัตถุดิบในการเพาะปลูกต่างๆ ในปริมาณที่มากขึ้นเช่น ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น เพื่อให้ได้ปริมาณปาล์มเพียงพอต่อการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มสเตียรีน และส่งผลต่อขั้นตอนการขนส่งเช่นกัน โดยเฉพาะการขนส่งทะลายปาล์มจากแหล่งเพาะปลูกไปยังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งต้องมีการขนส่งทะลายปาล์มเพื่อการผลิตปาล์มสเตียรีนในจำนวนรอบที่มากกว่าการขนส่งเพื่อผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ดังนั้นการใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลจึงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่ง มากกว่าการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ

เมื่อวิเคราะห์เฉพาะขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลพบว่า โรงงานซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.52 $kgCO_2/L$ และโรงงานซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.84 $kgCO_2/L$ เนื่องจากทั้ง 2 โรงงานมีข้อแตกต่างกันดังตารางที่ 4-24 โดยเฉพาะการใช้น้ำมันปาล์มต่างชนิดกันส่งผลให้กระบวนการผลิตภายในโรงงานมีความแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดในแต่ละกระบวนการภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลพบว่า โรงงานซึ่งใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ (CPO pretreatment) ก่อนนำมาเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ซึ่งกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบนั้นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากถึง 0.56 $kgCO_2/L$ ซึ่งมีค่ามากกว่าโรงงานที่ใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบปล่อยทั้งโรงงาน เพราะกระบวนการนี้มีการใช้พลังงานสูง ทั้งจากไฟฟ้า และน้ำมันเตา รวมถึงมีการใช้น้ำปริมาณมาก ส่งผลให้ก่อน้ำเสียต้องทำการบำบัด อีกทั้งมีการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ริฟิเคชันเพื่อทำปฏิกิริยากรดไขมันก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ทำให้มีสารขาเข้าตลอดทั้งกระบวนการจำนวนมาก และเกิดของเสียจำนวนมากเช่นกัน

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification process) ของทั้ง 2 โรงงานมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีความแตกต่างกันมากจนเป็นนัยสำคัญ เพราะวัตถุดิบในการเกิดปฏิกิริยาเหมือนกันทั้งสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โซเดียมเมทิลเลต ใช้แอลกอฮอล์ชนิดเดียวกันคือเมทานอล

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification process) ซึ่งทั้ง 2 โรงงานใช้วิธีแตกต่างกันคือ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้วิธีการกลั่นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.12 $kgCO_2/L$ และโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้วิธีการล้างด้วยน้ำปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.03 $kgCO_2/L$ ซึ่งวิธีการกลั่นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า เนื่องจากการกลั่นใช้พลังงานจากไฟฟ้า และน้ำมันเตาสูง มีการกลั่นถึง 3 หอกลั่น ในขณะที่การล้างด้วยน้ำมีการใช้น้ำและปล่อยน้ำเสียเป็นหลัก การใช้น้ำหากเป็นน้ำประปาต้องมีการคิดค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการได้มาซึ่งน้ำประปาด้วย หากเป็นน้ำบาดาลจะไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพราะ น้ำที่ได้จากแหล่งน้ำตามธรรมชาตินั้นจะมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ แต่ต้องมีการคิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากสถานีสูบและจ่ายน้ำ ซึ่งมีการใช้พลังงานในการสูบน้ำ การปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำมาใช้ และการจ่ายน้ำ ดังนั้นการใช้น้ำบาดาลจึงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าน้ำประปา แต่โดยรวมแล้วนั้นไม่ว่าจะใช้น้ำชนิดใดในการผลิต การใช้พลังงานในปริมาณที่มากกว่าก็ส่งผลให้วิธีการกลั่นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ

กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ (Glycerol purification process) ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.08 $kgCO_2/L$ ขณะที่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น (Glycerol pretreatment) ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.02 $kgCO_2/L$ ซึ่งการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า เนื่องจากเป็นกระบวนการทำให้บริสุทธิ์จะได้กลีเซอรอลที่มีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99 ซึ่งประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนย่อยทั้งการกลั่น โดยมี

มากถึง 3 หอกลั่น การกำจัดกลิ่น การกำจัดสี เป็นต้น ทำให้ใช้พลังงานสูง ขณะที่การปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้นเป็นกระบวนการเพื่อให้ได้กลีเซอรอลดิบเท่านั้น ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนที่ซับซ้อนน้อยกว่า

กระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (Methanol purification process) ทั้ง 2 โรงงานใช้วิธีการกลั่นเช่นเดียวกัน โรงงานที่ใช้เทคโนโลยีแบบแห้ง (0.03 $kgCO_2/L$) ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าโรงงานที่ใช้เทคโนโลยีแบบเปียก (0.02 $kgCO_2/L$) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะของเสียจากการกลั่นมีปริมาณน้อย โดยทางโรงงานที่ใช้เทคโนโลยีแบบแห้งมีการนำของเสียจากการกลั่นไปต้มไล่น้ำเพื่อเอาเศษน้ำมันที่เหลือให้เป็นสวัดิการใช้ภายในโรงงาน ส่วนโรงงานที่ใช้เทคโนโลยีแบบเปียกมีการนำของเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีทั้งการบำบัดแบบไร้อากาศและใช้อากาศ ทำให้ทั้ง 2 โรงงานมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใกล้เคียงกัน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ถ้าคำนึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล การใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบหลักจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการใช้ปาล์มสเตียรีน แต่ถ้าคำนึงเฉพาะภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซล การใช้ปาล์มสเตียรีนจะดีกว่าการใช้น้ำมันปาล์มดิบ เนื่องจากไม่ต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งใช้พลังงานต่างๆ รวมถึงสารขาเข้าอื่นๆ จำนวนมาก อีกทั้งทำให้เกิดน้ำเสียขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งต้องการระบบบำบัดน้ำเสีย ถ้าเปรียบเทียบลงไปในรายละเอียดย่อยพบว่า การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าวิธีการกลั่นถึง 4 เท่า เพราะใช้พลังงานน้อย และการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าการบำบัดกลีเซอรอลขั้นต้นถึง 3.8 เท่า เพราะมีการใช้พลังงานในกลั่นสูงเพื่อทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ จึงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากกว่า ส่วนกระบวนการที่ใช้วิธีการเหมือนกันนั้นได้แก่ กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน และกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.4 เปรียบเทียบกับค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไบโอดีเซลจากองค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก

ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไบโอดีเซลโดยเฉลี่ยซึ่งอ้างอิงจากองค์การบริหารก๊าซเรือนกระจกมีค่าประมาณ 1087 $kgCO_2/ton$ B100 (TGO., 2013., Nov) หรือ 0.94569 $kgCO_2/L$ B100 ในขณะที่ข้อมูลของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งตลอดวัฏจักรชีวิตไบโอดีเซลปล่อย 2.83 $kgCO_2/L$ เมื่อเปรียบเทียบพบว่า มีค่ามากกว่าถึงประมาณ 3 เท่า อาจเป็นผลเนื่องจาก

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในโรงงานผลิตไบโอดีเซลคือ ปาล์ม สเตียรีน ซึ่งต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบปริมาณมากกว่าปาล์มสเตียรีนที่ต้องการถึง 3.45 เท่า อีกทั้งสามารถเก็บข้อมูลภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลได้อย่างละเอียด ทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตน้ำมันปาล์ม และการปลูกปาล์มมากขึ้น ซึ่งการผลิตน้ำมันปาล์มมีการปล่อยน้ำเสียจำนวนมาก มีการบำบัดแบบบ่อไร้อากาศ โดยไม่มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพ และในขั้นตอนการปลูกมีการใช้ปุ๋ยจำนวนมาก โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจนซึ่งมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง จึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าค่าเฉลี่ยของภายในประเทศเช่นกัน

โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกตลอดวัฏจักรชีวิตไบโอดีเซลปล่อย 1.89 $kgCO_2/L$ ซึ่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าถึง 2 เท่า โดยเกิดจากขั้นตอนโรงงานผลิตไบโอดีเซลเป็นหลัก เนื่องจากมีการใช้ปาล์มสเตียรีนผสมกับน้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบขาเข้า ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบก่อนนำไปใช้ รวมถึงมีระบบบำบัดน้ำเสียภายในโรงงาน ซึ่งไม่มีการกักเก็บก๊าซชีวภาพ และสามารถทำการเก็บข้อมูลได้อย่างละเอียด ส่วนขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มมีการปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 25 เท่า และในขั้นตอนการปลูกปาล์มก็มีการใช้ปุ๋ยทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปตัสเซียม ซึ่งการผลิตปุ๋ยเหล่านี้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง โดยเฉพาะการผลิตปุ๋ยไนโตรเจน อีกทั้งมีการใช้ยาปราบวัชพืช โดยเฉพาะกริปโฟเซต (Glyphosate) ซึ่งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงเช่นกัน จึงทำให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรมากกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศ

4.3.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

1) เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Gheewala S.H. และคณะ (2011)

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ภายในประเทศ ในงานวิจัยของ Gheewala et al. (2011) ประเมินการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตของ 3 จังหวัดซึ่งเป็นที่นิยมปลูกปาล์มในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี และปทุมธานี พบว่าจังหวัดกระบี่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือ 1.052 $kgCO_2/L$ ซึ่งขั้นตอนการปลูกปาล์มน้ำมันปล่อยมากที่สุด รองลงมาคือ โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โรงงานผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยนี้ซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) (2.83 $kgCO_2/L$) พบว่าปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่างานวิจัยของ Gheewala et al. (2011) ถึง 2.69 เท่า เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มและโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างละเอียดทั้งจากงานวิจัยต่างๆ

และจากการสอบถาม สัมภาษณ์จากโรงงานผลิตไบโอดีเซลโดยตรง และงานวิจัยนี้ไม่มีการคำนวณถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พื้นที่ดิน (Land use change)

ผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล โดยโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) (1.89 $kgCO_2/L$) เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Gheewala et al. (2011) (จังหวัดกระบี่ 1.052 $kgCO_2/L$) พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีความแตกต่างกันทั้งปริมาณ และลำดับการปล่อยจากมากไปน้อยของแต่ละขั้นตอนเช่น ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยโรงงานซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบแห้งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด ขณะที่งานวิจัยของ Gheewala et al. (2011) ขั้นตอนการปลูกปาล์มปล่อยมากที่สุด เนื่องจากงานวิจัยของ Gheewala et al. (2011) มีการนำความเปลี่ยนแปลงของการใช้พื้นที่ (Land use change) มาคิดคำนวณด้วย

2) เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Gheewala S.H. และคณะ (2012)

ในงานวิจัยของ Gheewala et al. (2012) ประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตโดยไม่มีการคำนึงการใช้พื้นที่ดิน (Land use change) พบว่าปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 1.343 $kgCO_2/L$ โดยขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มปล่อยมากที่สุด รองลงมาคือ การปลูกปาล์ม การขนส่ง และการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่างานวิจัยนี้ซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) (2.83 $kgCO_2/L$) เพราะในงานวิจัยนี้ขั้นตอนโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีการเก็บข้อมูลอย่างละเอียด แต่เมื่อพิจารณาลำดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากมากไปน้อยนั้นพบว่า ลำดับมีความสอดคล้องกันคือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มปล่อยมากที่สุด รองลงมาเป็นการปลูกปาล์ม ซึ่งลำดับมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในขั้นตอนการขนส่งเนื่องจากการขนส่งทะลายปาล์มและน้ำมันปาล์มนั้นมีความแตกต่างกันในแต่ละงานวิจัย อย่างไรก็ตามขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลก็ยังคงปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มและการปลูกปาล์มเหมือนกัน

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยของ Gheewala et al. (2012) กับงานวิจัยนี้ซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) (1.89 $kgCO_2/L$) พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใกล้เคียงกัน เพราะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลเป็นน้ำมันปาล์มดิบเหมือนกัน ส่วนโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกนั้นมีการใช้ปาล์มสเตียรีนในการผลิตด้วย จึงทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากกว่างานวิจัยของ Gheewala et al. (2012) แต่เมื่อพิจารณาลำดับการปล่อยมากน้อยแล้วพบว่า มีความแตกต่างกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้วิเคราะห์การผลิตน้ำมันปาล์มและการปลูกปาล์ม เพื่อการผลิตเป็นปาล์มสเตียรีนเท่านั้น ซึ่งปริมาณปาล์มสเตียรีนน้อยกว่าปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ จึงทำให้ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม และการปลูกปาล์ม ปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Pacca S. และคณะ (2010)

งานวิจัยในต่างประเทศของ Pacca et al. (2010) ประเทศบราซิลพบว่าปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1901.23 $kgCO_2/ha/yr$ ซึ่งปล่อยมากที่สุดจากขั้นตอนการปลูกปาล์ม รองลงมาคือ การผลิตไบโอดีเซล การผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่ง ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงกับงานวิจัยนี้ทั้ง 2 โรงงาน อาจเป็นเนื่องจากพฤติกรรมการปลูกปาล์มน้ำมันที่แตกต่างกัน สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศที่แตกต่างกัน เป็นต้น

4) สรุป

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยภายในประเทศกับงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลมีความแตกต่างกัน เนื่องจากข้อมูลโรงงานผลิตไบโอดีเซลทั้ง 2 โรงงานของงานวิจัยนี้ มีการใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบ จึงเป็นสาเหตุสำคัญทำให้มีผลที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้าโรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว คาดว่าผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของจากการจัดลำดับขั้นตอนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากมากไปน้อยนั้นพบว่า มีความแตกต่างแต่ก็ยังมีความสอดคล้องกันเพราะ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าขั้นตอนการปลูกปาล์มเสมอ ส่วนการเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่างประเทศพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งปริมาณและลำดับของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อาจเป็นผลจากลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะภูมิอากาศที่แตกต่างกันในการปลูกปาล์ม ลักษณะและวิธีที่ต่างกันในการผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 การประเมินผลและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงาน (Energy consumption)

4.4.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process)

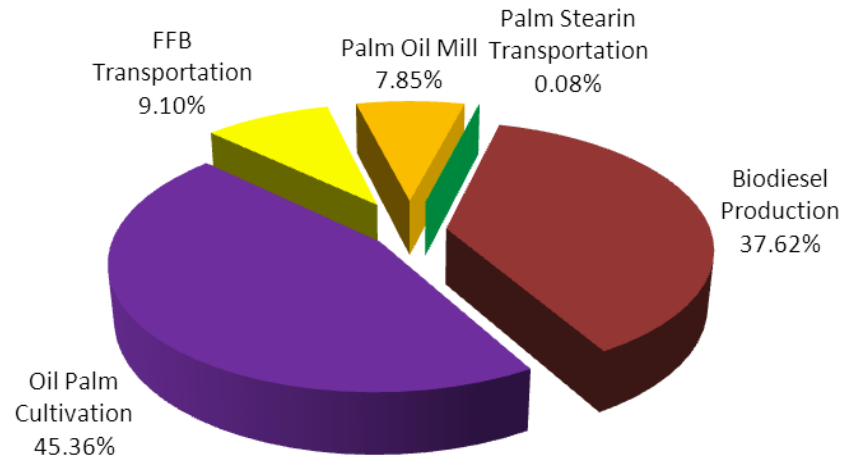
ปริมาณการใช้พลังงาน (Energy Input) ตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลโดยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) เท่ากับ 30.49 MJ/L จากตารางที่ 4-22 และภาพที่ 4-9 พบว่าขั้นตอนการปลูกปาล์มใช้พลังงานมากที่สุดถึง 13.83 MJ/L (ร้อยละ 45.46) เนื่องจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบซึ่งได้แก่ ปุ๋ยและยาปราบวัชพืชมีการใช้พลังงานสูง เช่น การผลิตปุ๋ยไนโตรเจนใช้พลังงาน 57.47 MJ/kg-N การผลิตยาปราบวัชพืชกริปโฟเสต (Glyphosate) ใช้พลังงาน 452.5 MJ/kg Glyphosate เป็นต้น รองลงมาคือขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 37.62 เพราะผลิตด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งซึ่งใช้วิธีการกลั่นในกระบวนการผลิตเป็นหลัก ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า และ

พลังงานจากการเผาไหม้น้ำมันเตาจำนวนมาก อีกทั้งค่าการใช้พลังงานของเมทานอลที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงถึง 7.09 MJ/L ขั้นตอนการขนส่งใช้พลังงานร้อยละ 9.18 จากการใช้น้ำมันดีเซลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการขนส่ง ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มใช้พลังงานน้อยที่สุดคือ 2.39 MJ/L เท่ากับร้อยละ 7.85 เพราะมีการนำของเสียจากกระบวนการผลิตเช่น ใยปาล์ม นำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำกลับเข้าสู่ระบบการผลิตได้อีก จึงเป็นการทดแทนการใช้พลังงานในการผลิตน้ำมันปาล์ม

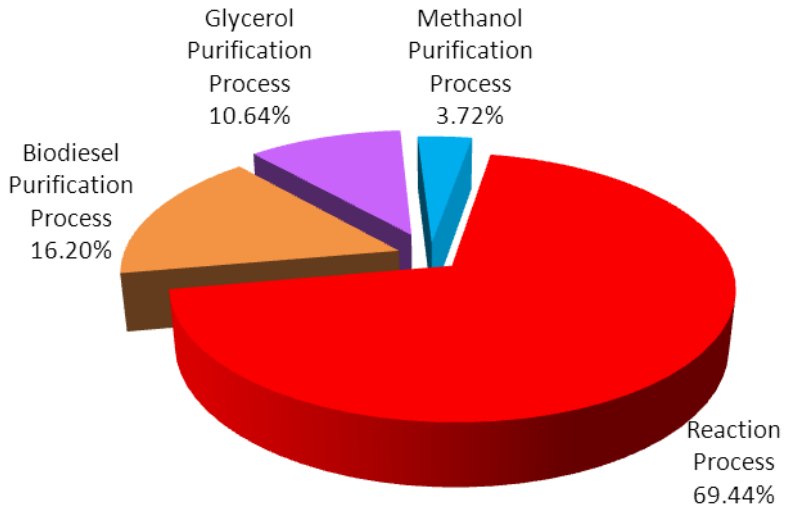
ปริมาณการใช้พลังงานเฉพาะภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 4-22 และภาพที่ 4-10 พบว่าโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) ใช้พลังงาน 11.47 MJ/L โดยกระบวนการที่ใช้พลังงานมากที่สุดคือ กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน 7.97 MJ/L (ร้อยละ 69.44) รองลงมาคือ กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ และกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ ตามลำดับ กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอร์ริฟิเคชันใช้พลังงานมากที่สุดเพราะ ใช้พลังงานมากในส่วนของการได้มาซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต โดยเฉพาะจากเมทานอล ส่วนกระบวนการทำไบโอดีเซลและกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ใช้วิธีการกลั่น โดยมี 3 หอกลั่นในแต่ละกระบวนการ ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า พลังงานจากเชื้อเพลิงน้ำมันเตา ในปริมาณสูง ในกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ใช้พลังงาน 0.43 MJ/L ซึ่งน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ เนื่องจากใช้พลังงานในการกลั่นเพียง 1 หอกลั่น ไม่มีพลังงานจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ และไม่มีการใช้พลังงานในการขนส่งวัตถุดิบ

ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ได้ (Energy output) จากผลิตภัณฑ์ที่ผลิตตลอดวัฏจักรชีวิตได้แก่ ใยปาล์ม เมล็ดในปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า กลีเซอรอล เมทานอล และไบโอดีเซล โดยใช้ค่าความร้อนในการคำนวณดังตารางที่ 4-20 เท่ากับ 126.22 MJ/L ส่วนพลังงานที่ได้จากไบโอดีเซลเท่านั้นคือ 33.12 MJ/L

จากปริมาณพลังงานที่ใช้ และพลังงานที่ได้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าพลังงานสุทธิ (Net Energy Balance, NEB) และค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ (Net Energy Ratio, NER) ซึ่งเมื่อพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลจะได้ค่าพลังงานสุทธิเท่ากับ 95.72 MJ/L ค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ 4.14 และเมื่อวิเคราะห์เฉพาะพลังงานที่ได้จากไบโอดีเซล จะมีค่าพลังงานสุทธิเท่ากับ 2.63 MJ/L ค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ 1.79 ซึ่งค่าพลังงานสุทธิจากทั้ง 2 กรณีมีค่าเป็นบวก และค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิมีค่าเกิน 1.00 นั่นหมายถึงการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) จากปาล์มสเตียรีนได้ประโยชน์ทางพลังงานมากกว่าปริมาณพลังงานที่ใช้ไป ดังนั้นจึงคุ้มค่าที่จะลงทุน



ภาพที่ 4-9 ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง



ภาพที่ 4-10 ปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง

4.4.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process)

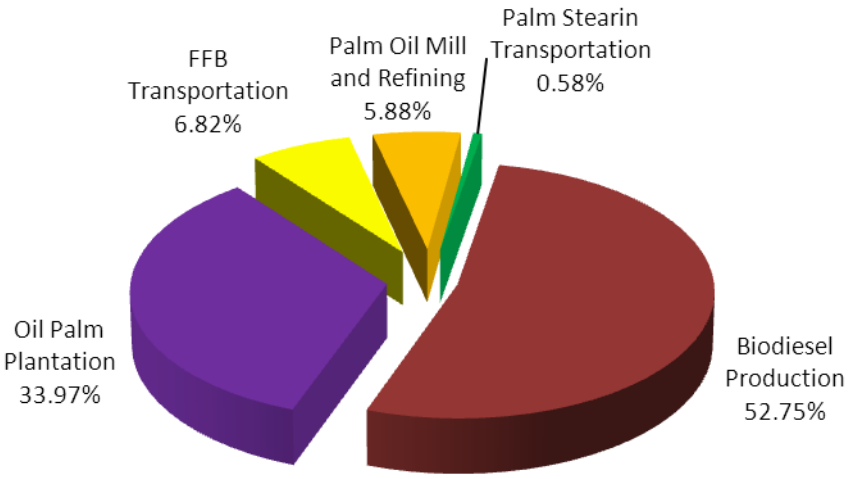
ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลคือ 18.51 MJ/L ซึ่งใช้น้ำมันปาล์มดิบและปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบ จากตารางที่ 4-23 และภาพที่ 4-11 แสดงถึงการใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนพบว่า มีการใช้พลังงานสูงสุดอยู่ที่ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล 9.77 MJ/L เพราะเมทานอลเป็นสาเหตุสำคัญ การผลิตเมทานอลมีการใช้พลังงานสูง ซึ่งเมทานอลเป็นส่วนประกอบหลักของโรงงานผลิตไบโอดีเซล และการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบก็เป็นเหตุให้ต้องใช้เมทานอลในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบก่อนนำมาใช้งานอีกด้วย จึงทำให้มีค่าการใช้พลังงานสูงกว่าขั้นตอนอื่น รองลงมาคือ การปลูกปาล์มร้อยละ 33.97 เนื่องจากการปลูกปาล์มเป็นการอ้างอิงเพื่อใช้ผลิตปาล์มสเตียรีนเท่านั้น ไม่รวมการปลูกเพื่อผลิตน้ำมันปาล์มดิบ อีกทั้งการผลิตปุ๋ย โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน ใช้พลังงานสูง รองมาคือการขนส่งร้อยละ 7.40 และการผลิตน้ำมันปาล์มร้อยละ 5.88 ตามลำดับ การผลิตน้ำมันปาล์มใช้พลังงานน้อยที่สุด เพราะมีการนำของเสียคือ ใยปาล์ม มาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ กลับเข้าสู่การผลิตใหม่

เมื่อพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 9.77 MJ/L จากตารางที่ 4-23 และภาพที่ 4-12 พบว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น และกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ มีการใช้พลังงานจากมากไปน้อยตามลำดับ การบำบัดน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น (ร้อยละ 61.23) ใช้พลังงานหลักๆ จากการได้มาซึ่งวัตถุดิบของน้ำมันปาล์มดิบ และเมทานอล การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (ร้อยละ 29.55) มีการใช้พลังงานสูงเนื่องจากการได้มาซึ่งเมทานอล กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (ร้อยละ 3.42) ใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น (ร้อยละ 3.18) เนื่องจากมีการใช้น้ำ ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำบาดาล ต้องใช้พลังงานในการสูบน้ำ และการปรับปรุงคุณภาพน้ำ รวมถึงต้องใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น ส่วนกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (ร้อยละ 2.62) ใช้พลังงานน้อยที่สุด พลังงานที่ใช้หลักๆ มาจากการใช้น้ำมันเตา

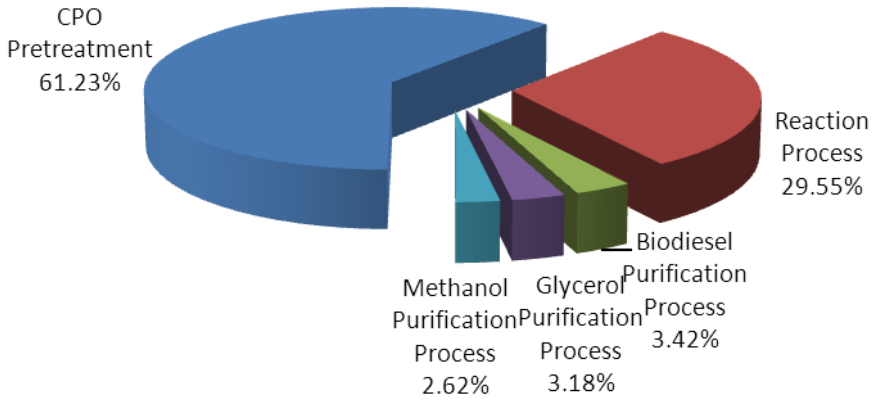
ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตมีค่าเท่ากับ 76.94 MJ/L ซึ่งคำนวณจากค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นคือ ใยปาล์ม เมล็ดในปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า กลีเซอรอล เมทานอล และไบโอดีเซล โดยพลังงานที่ได้จากเฉพาะไบโอดีเซลคือ 33.12 MJ/L

เมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานสุทธิ (NEB) และค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ (NER) ตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตพบว่ามีค่าเท่ากับ 58.42 MJ/L และ 4.16 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะพลังงานที่ได้จากไบโอดีเซล จะมีค่าพลังงานสุทธิ 14.61 MJ/L ค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ 1.79 ซึ่งหมายถึง ไม่

ว่าจะเป็นการคิดคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมดหรือเฉพาะไบโอดีเซล ก็ยังคงได้ประโยชน์ทางพลังงานมากกว่าพลังงานที่ลงทุนไปในการผลิต จึงคุ้มค่าในการลงทุน



ภาพที่ 4-11 ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก



ภาพที่ 4-12 ปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก

4.4.3 เปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) เท่ากับ 30.49 MJ/L ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 18.51 MJ/L ซึ่งมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลต่างชนิดกัน โดยโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้น้ำมันปาล์มดิบและปาล์ม สเตียรีน ขณะที่โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้เพียงปาล์มสเตียรีนเท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงลำดับการใช้พลังงานจากมากไปน้อยของขั้นตอนต่างๆ มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยคือ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งมีการใช้พลังงานสูงสุดที่ขั้นตอนการปลูกปาล์ม ส่วนโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีการใช้พลังงานสูงสุดที่ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล เพราะมีการใช้ปริมาณปาล์มสเตียรีนที่แตกต่างกัน แต่โดยรวมขั้นตอนการขนส่งของทั้ง 2 โรงงานยังคงมีปริมาณการใช้พลังงานสูงกว่าขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มเช่นเดียวกัน เนื่องจากการผลิตน้ำมันปาล์มจะมีการนำของเสียจากกระบวนการผลิตเช่น ใยปาล์ม นำมาเผาเพื่อให้ความร้อน ทำไอน้ำ และผลิตไฟฟ้ากลับมาใช้ภายในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มอีกครั้ง

ขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่ง มีการใช้พลังงานมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันปาล์มซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล การใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบทำให้มีปริมาณการใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม และการปลูกปาล์มสูงกว่าการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ เพราะการจะได้ปาล์มสเตียรีน 1 กิโลกรัมต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบ 3.45 กิโลกรัม และทำให้การผลิตปาล์มสเตียรีนต้องการปริมาณทะลายปาล์มมากกว่า จึงใช้ปุ๋ย ยาปราบวัชพืช และวัตถุดิบในการผลิตปาล์มน้ำมันอื่นๆ จำนวนมากกว่า โดยในขั้นตอนการปลูกปาล์มนั้นมีการใช้พลังงานจำนวนมาก เนื่องจากการใช้ปุ๋ย โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจนมีค่าการใช้พลังงาน 57.47 MJ/kg และการใช้ยาปราบวัชพืชได้แก่ Glyphosate 452.5 MJ/kg Paraquat 458.4 MJ/kg และการใช้ปาล์มสเตียรีนก็ส่งผลให้ต้องมีการขนส่งทะลายปาล์มในจำนวนที่มากกว่าการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบเช่นกัน

ปริมาณการใช้พลังงานเฉพาะภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลพบว่า โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) ใช้ 11.47 MJ/L โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) ใช้ 9.77 MJ/L ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานในโรงงานผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่เกิดจากการได้มาซึ่งเมทานอล ซึ่งโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีการใช้ปริมาณเมทานอลน้อยกว่าโรงงานวีระสุวรรณ เพราะมีการนำเมทานอลที่ได้จากกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน เมื่อพิจารณาถึงลำดับการใช้

พลังงานจากมากไปน้อยของทั้ง 2 โรงงานพบว่ามีความสอดคล้องกันคือ กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์หรือการบำบัดกลีเซอรอลขั้นต้น และการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ ตามลำดับ ซึ่งการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมที่ต่างจากโรงงานซึ่งใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบคือกระบวนการบำบัดน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น โดยกระบวนการนี้ประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนย่อย รวมถึงขั้นตอนปฏิกิริยาเอสเตอร์ริฟิเคชัน ซึ่งใช้พลังงานสูงเนื่องจากการได้มาซึ่งน้ำมันปาล์มดิบ และการได้มาซึ่งเมทานอล จึงมีการใช้พลังงานที่สูงกว่ากระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดในแต่ละกระบวนการภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลพบว่า โรงงานซึ่งใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ (CPO pretreatment) ก่อนนำมาเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ซึ่งกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบนั้นมีการใช้พลังงาน 5.98 MJ/L เพราะกระบวนการนี้มีสารขาเข้าตลอดทั้งกระบวนการจำนวนมาก มีการใช้พลังงานสูงทั้งจากไฟฟ้า และน้ำมันเตา รวมถึงมีการใช้น้ำปริมาณมาก ทำให้เกิดของเสียจำนวนมากเช่นกัน โดยเฉพาะน้ำเสียที่ต้องทำการบำบัด ซึ่งประกอบด้วยการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic wastewater treatment) และการบำบัดแบบเติมอากาศ (Aerobic wastewater treatment) การบำบัดแบบไร้อากาศไม่มีการใช้พลังงาน แต่การบำบัดแบบเติมอากาศนั้นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศให้แก่แบคทีเรียเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งมีการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ริฟิเคชันเพื่อทำปฏิกิริยากรดไขมันก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ซึ่งต้องใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยา ทำให้มีค่าพลังงานการได้มาซึ่งเมทานอลสูง

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification process) ของทั้ง 2 โรงงานมีความแตกต่างกัน เนื่องจากเมทานอลเป็นสาเหตุสำคัญ เพราะการนำเมทานอลจากกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่ ทำให้ช่วยลดการใช้พลังงานในการได้มาซึ่งเมทานอล

เมื่อพิจารณากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification process) วิธีการกลั่นใช้พลังงาน 1.86 MJ/L ซึ่งมากกว่าวิธีล้างด้วยน้ำที่ใช้พลังงาน 0.33 MJ/L เพราะวิธีการกลั่นมีการใช้ไฟฟ้า และน้ำมันเตา สูงกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ แม้ว่าวิธีการล้างด้วยน้ำมีการก่อน้ำเสียซึ่งต้องทำการบำบัด ระบบบำบัดก็ต้องใช้พลังงานโดยเฉพาะการบำบัดแบบเติมอากาศ และแม้ว่าน้ำที่ใช้เป็นน้ำบาดาลซึ่งต้องใช้พลังงานในระบบสูบจ่ายน้ำ แต่โดยรวมแล้วก็ยังใช้พลังงานในปริมาณที่น้อยกว่าวิธีการกลั่น

กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ (Glycerol purification process) ด้วยวิธีการกลั่น มีการกำจัดสีและกลิ่น ซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอนย่อย จึงทำให้ใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้นเท่านั้น

กระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (Methanol purification process) ทั้ง 2 โรงงานใช้วิธีการกลั่นเหมือนกัน แต่มีปริมาณการใช้พลังงานต่างกัน เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่รวบรวมได้มีปริมาณที่ต่างกัน การกลั่นเมทานอลจำนวนมากกว่าจึงทำให้ใช้พลังงานมากกว่า อีกทั้งของเสียจากการกลั่นถ้านำมาผ่านขั้นตอนการต้มไล่น้ำออกก็ต้องใช้พลังงานมากกว่าการนำของเสียผ่านขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

ค่าพลังงานสุทธิ (NEB) ตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) คือ 95.72 MJ/L และค่าพลังงานสุทธิตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 58.42 MJ/L ซึ่งแม้ว่าค่าการใช้พลังงาน (Energy input) ของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งมีค่ามากกว่า แต่ก็มีค่าพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ (Energy output) สูงเช่นกัน เพราะมีปริมาณการใช้ปาล์มสเตียรีนมากกว่า จึงทำให้ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มมีการผลิตใยปาล์ม เมล็ดในปาล์ม กะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่าในปริมาณที่มากกว่า ซึ่งส่งผลให้มีค่าพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์มีค่าสูงตามไปด้วย ค่าพลังงานสุทธิของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งจึงสูงกว่าโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก แต่ค่าพลังงานสุทธิของทั้ง 2 โรงงานไม่ติดลบ เพราะฉะนั้นการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตของทั้ง 2 โรงงาน จึงให้พลังงานมากกว่าใช้พลังงานในการผลิต ค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ (NER) ตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง และโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกคือ 4.14 และ 4.16 ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นสามารถให้พลังงานมากกว่าการใช้พลังงานถึงประมาณ 4 เท่า จากค่าพลังงานสุทธิและค่าอัตราส่วนทางพลังงานสามารถสรุปได้ว่า ทั้ง 2 โรงงานได้พลังงานจากผลิตภัณฑ์มากกว่าพลังงานที่ลงทุนไป

ค่าพลังงานสุทธิ (NEB) ตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งพิจารณาเฉพาะไบโอดีเซล โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง และโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกคือ 2.63 MJ/L และ 14.61 MJ/L ตามลำดับ โดยเป็นการนำค่าการให้พลังงานของไบโอดีเซล 33.12 MJ/L มาคิดเป็นค่าพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ (Energy output) เพียงผลิตภัณฑ์เดียวเท่านั้น ซึ่งโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีค่าพลังงานสุทธิมากกว่าโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง เพราะเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลแบบแห้งใช้วิธีการกลั่นเป็นหลัก จึงมีปริมาณการใช้พลังงานมากกว่า แต่ทั้ง 2 โรงงานก็ยังคงให้พลังงานมากกว่าการใช้พลังงาน ค่าอัตราส่วนทางพลังงาน (NER)

เฉพาะไบโอดีเซล โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งมีค่าเท่ากับ 1.09 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีค่าเท่ากับ 1.79 ซึ่งหมายถึงทั้ง 2 โรงงานมีการให้พลังงานมากกว่าการใช้พลังงานแต่ไม่มากนัก เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาเฉพาะไบโอดีเซลของแต่ละโรงงานมีสัดส่วนการให้พลังงานมากกว่าการใช้พลังงาน ดังนั้นแม้ว่าหากผลิตภัณฑ์อื่นๆ (ยกเว้นไบโอดีเซล) ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ การผลิตไบโอดีเซลก็ยังคงให้พลังงานสูงกว่าพลังงานที่ลงทุนไป

สรุปจากศึกษาด้านพลังงาน การใช้เทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) มีปริมาณการใช้พลังงาน (Energy input) มากกว่าการใช้เทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) ทั้งกรณีการวิเคราะห์ตลอดวัฏจักรชีวิตไบโอดีเซล และกรณีการวิเคราะห์เฉพาะโรงงานผลิตไบโอดีเซล เพราะวิธีการกลั่นใช้พลังงานไฟฟ้า และน้ำมันเตามากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ ซึ่งการใช้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่แตกต่างกันก็ส่งผลให้ใช้พลังงานแตกต่างเช่นกัน เมื่อพิจารณาถึงลำดับการใช้พลังงานจากมากไปน้อยของขั้นตอนต่างๆ พบว่าทั้ง 2 โรงงานมีการใช้พลังงานที่สอดคล้องกันคือ ขั้นตอนการปลูกปาล์มมีการใช้พลังงานสูงกว่าขั้นตอนการขนส่ง และขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีความแตกต่างเล็กน้อยในลำดับของโรงงานผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีการใช้ปริมาณปาล์มสเตียรีนที่ต่างกัน ลำดับของปริมาณการใช้พลังงานเฉพาะภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลของทั้ง 2 โรงงานนั้นมีความสอดคล้องกันคือ กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การบำบัดขั้นต้นหรือทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ และการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ ตามลำดับ จากการพิจารณาค่าพลังงานสุทธิและค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบดีกว่าการใช้น้ำมันปาล์มดิบ เพราะถึงแม้จะใช้พลังงานมากแต่ก็ได้พลังงานกลับมามากเช่นกัน โดยเฉพาะจากขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม แต่ถ้าคำนึงถึงเฉพาะพลังงานที่ได้จากไบโอดีเซลจะสรุปได้ว่า การใช้น้ำมันปาล์มดิบดีกว่าการใช้ปาล์มสเตียรีน และการใช้เทคโนโลยีแบบเปียกประหยัดพลังงานกว่าเทคโนโลยีแบบแห้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.4 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

ค่าพลังงานสุทธิ (NEB) ของน้ำมันดีเซลคือ -8.3 MJ/kg และค่าอัตราส่วนทางพลังงาน (NER) ของน้ำมันดีเซลคือ 0.84 (Malakul P. และคณะ, 2010) ซึ่งมีค่าพลังงานสุทธิติดลบ และอัตราส่วนทางพลังงานไม่ถึง 1 หมายความว่ามีการใช้พลังงานในการผลิตน้ำมันดีเซลมากกว่าการให้พลังงานของน้ำมันดีเซล ในขณะที่การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลของงานวิจัยนี้ให้ค่าพลังงานสุทธิเป็นบวก และอัตราส่วนทางพลังงานมีค่าเกิน 1 เพราะฉะนั้นในด้านพลังงานของการผลิตไบโอดีเซลจึงดีกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันไม่ได้ใช้เพียงพลังงานที่มนุษย์ผลิตขึ้นเท่านั้นเช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานปิโตรเลียม เป็นต้น ยังมีการใช้พลังงานจากธรรมชาติอีกด้วยนั่นก็คือ พลังงาน

แสงอาทิตย์ มาช่วยในการสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตปาล์มน้ำมัน ในขณะที่การผลิตน้ำมันดีเซลต้องมีการสกัด การกลั่นและกระบวนการอื่นๆ โดยต้องใช้พลังงานที่มนุษย์ผลิตขึ้นเท่านั้น (Malakul P. และคณะ, 2010) เมื่อพิจารณาในด้านของการนำไปใช้งานพบว่าน้ำมันดีเซล (43.10 MJ/kg) ให้พลังงานที่สูงกว่าไบโอดีเซล (38.07 MJ/kg) (Gheewala S.H. และคณะ, 2009) น้ำมันดีเซลจึงดีกว่าไบโอดีเซลในด้านการนำไปใช้งาน แต่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนในด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลดีกว่าน้ำมันดีเซล ดังนั้นโดยรวมแล้วไบโอดีเซลดีกว่าน้ำมันดีเซล

4.4.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

1) งานวิจัยภายในประเทศของ Gheewala S.H. และคณะ (2009)

งานวิจัยของ Gheewala et al. (2009) ซึ่งเป็นงานวิจัยภายในประเทศไทย มีปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 15.75 MJ/kg-B100 โดยมีการใช้พลังงานสูงสุดที่ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล รองลงมาเป็นการขนส่ง การปลูกปาล์ม และการผลิตน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกับปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) (35.05 MJ/kg-B100) ทั้งในด้านปริมาณและการเรียงลำดับ เนื่องจากมีวัตถุดิบหลักที่ใช้การผลิตไบโอดีเซลต่างกันคือ Gheewala et al. (2009) ใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined palm oil หรือ Palm olein) ขณะที่โรงงานวีระสุวรรณใช้ปาล์ม สเตียรีน ซึ่งการจะผลิตปาล์ม สเตียรีนจำนวนหนึ่ง ต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบถึง 3.45 เท่าของจำนวนนั้น ส่วนการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จำนวนหนึ่ง ต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบ 1.41 เท่า จึงส่งผลให้ต้องการปริมาณปาล์มน้ำมันมากขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานสุทธิ ค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิต งานวิจัยของ Gheewala et al. (2009) มีค่า 40.55 MJ/kg-B100 และ 3.58 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของงานวิจัยนี้ เพราะมีการคำนวณค่าการให้พลังงานของผลิตภัณฑ์ (Energy output) แตกต่างกัน โดยงานวิจัยของ Gheewala et al. (2009) คำนวณจากไบโอดีเซล กลีเซอรอล เมล็ดในปาล์ม และกะลาปาล์ม ขณะที่งานวิจัยนี้คำนวณจากผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงได้แก่ ไบโอดีเซล กลีเซอรอล เมทานอล เมล็ดในปาล์ม กะลาปาล์ม ใยปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า ดังนั้นงานวิจัยของ Gheewala et al. (2009) จึงมีค่าการให้พลังงานที่ต่ำกว่างานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาค่าพลังงานสุทธิ ค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตเฉพาะของไบโอดีเซล งานวิจัยของ Gheewala et al. (2009) ให้ผลคือ 22.32 MJ/kg-B100 และ 2.42 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าของไบโอดีเซลจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) เนื่องจากการใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบต้องการปริมาณปาล์มน้ำมันมากกว่าการใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบ ทำให้ขั้นตอนการปลูกปาล์ม และการผลิตน้ำมันปาล์มใช้พลังงานสูง อีกทั้งโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วย

เทคโนโลยีแบบแห้งใช้วิธีการกลั่นเป็นหลักในทุกกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงใช้พลังงานสูงกว่า แต่ก็มีการให้พลังงานจากผลิตภัณฑ์สูงกว่าเช่นกัน จึงทำให้มีค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานที่ต่ำกว่าของงานวิจัยนี้

เปรียบเทียบการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) (21.28 MJ/kg-B100) กับงานวิจัยของ Gheewala et al. (2009) พบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่การเรียงลำดับการใช้พลังงานมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เพราะวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานผลิตไบโอดีเซลต่างกัน แต่โดยรวมมีความสอดคล้องกันคือ ขั้นตอนโรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้พลังงานมากที่สุด รองมาเป็นการปลูกปาล์ม และการผลิตน้ำมันปาล์มใช้พลังงานน้อยที่สุด โดยที่แตกต่างกันคือ ขั้นตอนการขนส่ง ซึ่งขึ้นกับระยะทางขนส่งในแต่ละโรงงาน โดยแต่ละงานวิจัยนั้นทำการเก็บข้อมูลจากโรงงานที่ต่างสถานที่กัน จึงใช้พลังงานในการขนส่งที่ต่างกัน ค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของงานวิจัย Gheewala et al. (2009) มีความแตกต่างกับของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกของงานวิจัยนี้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาคำนวณการให้พลังงานแตกต่างกัน ทำให้งานวิจัยนี้มีค่าการให้พลังงานสูง จึงส่งผลให้ค่าการคำนวณทั้งค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานของงานวิจัยนี้สูงกว่าของ Gheewala et al. (2009) เมื่อพิจารณาค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตเฉพาะไบโอดีเซลพบว่า Gheewala et al. (2009) มีค่าสูงกว่าเพราะมีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่า

2) งานวิจัยภายในประเทศของ Malakul P. และคณะ (2010)

งานวิจัยภายในประเทศอีกงานที่นำมาเปรียบเทียบคือ งานวิจัยของ Malakul et al. (2010) พบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานเท่ากับ 16.17 MJ/kg-B100 ซึ่งน้อยกว่าการใช้พลังงานในการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) เพราะมีการใช้วัตถุดิบหลักต่างกัน และกระบวนการภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลที่ต่างกันคือ Malakul et al. (2010) ใช้น้ำมันปาล์มดิบและปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบ โดยใช้วิธีการล้างด้วยน้ำในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ขณะที่โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้ปาล์มสเตียรีน โดยใช้วิธีการกลั่นในการผลิตไบโอดีเซลเป็นหลัก ซึ่งวิธีการกลั่นจะสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ เมื่อทำการเรียงลำดับการใช้พลังงานจากมากไปน้อยในงานวิจัยของ Malakul et al. (2010) ให้ผลว่าโรงงานผลิตไบโอดีเซล การปลูกปาล์ม การขนส่ง และการผลิตน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของงานวิจัยนี้คือ การปลูกปาล์มใช้พลังงานมากกว่าการขนส่ง และการผลิตน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ แต่แตกต่างเล็กน้อยในส่วนของโรงงานผลิตไบโอดีเซล เพราะวิธีการกลั่นใช้พลังงานสูง อีกทั้งงานวิจัยนี้มีการเก็บข้อมูลของโรงงานอย่างละเอียด จึงทำให้มีการใช้พลังงานปริมาณมาก แต่เนื่องจากใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบ จึงส่งผลให้ขั้นตอนการปลูก

ปาล์มใช้พลังงานสูงกว่าขั้นตอนโรงงานผลิตไบโอดีเซล ค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของ Malakul et al. (2010) มีค่าเท่ากับ 37.63 MJ/kg-B100 และ 3.33 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งตลอดวัฏจักรชีวิต เพราะมีการคำนวณพลังงานที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ส่วนค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตเฉพาะของไบโอดีเซลในงานวิจัย Malakul et al. (2010) มีค่า 24.03 MJ/kg-B100 และ 2.49 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าของงานวิจัยนี้ เพราะ Malakul et al. (2010) ใช้พลังงานน้อยกว่างานวิจัยนี้

ในงานวิจัยของ Malakul et al. (2010) พบว่าปริมาณการใช้พลังงานมีความใกล้เคียงกับของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) อีกทั้งลำดับการใช้พลังงานก็มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน เพราะโรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้วัตถุดิบเป็นน้ำมันปาล์มดิบและปาล์มสเตียรีนเหมือนกัน ส่วนค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตมีความแตกต่างกัน เนื่องจากมีการผลิตภัณฑ์ที่นำมาคิดคำนวณค่าการให้พลังงานแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนพลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตเฉพาะไบโอดีเซล มีความแตกต่างกันเล็กน้อย เพราะการใช้พลังงานมีปริมาณที่ต่างกันเล็กน้อย

3) งานวิจัยต่างประเทศของ Pacca S. และคณะ (2010)

งานวิจัยจากต่างประเทศของ Pacca et al. (2010) ประเทศบราซิล ซึ่งมีค่าอัตราส่วนทางพลังงาน (พิจารณาเฉพาะไบโอดีเซล) เท่ากับ 4.99 มีลำดับการใช้พลังงานจากมากไปน้อยคือ การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซล การปลูกปาล์ม และการขนส่ง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงทั้งการเรียงลำดับปริมาณการใช้พลังงาน และค่าอัตราส่วนทางพลังงานกับงานวิจัยนี้ทั้ง 2 โรงงานผลิตไบโอดีเซล เพราะมีสารขาเข้าที่แตกต่างกันเช่น ในขั้นการปลูกปาล์ม Pacca et al. (2010) มีการคิดพลังงานจากการใช้ยาฆ่าแมลง ปุ๋ยโบรอน ปุ๋ยเมกนีเซียม มูลสัตว์ และน้ำจากชลประทาน ขณะที่งานวิจัยนี้ไม่มีข้อมูลเหล่านี้ หรือในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล Pacca et al. (2010) สารขาเข้ามีเพียงเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยา และไฟฟ้าเท่านั้น ขณะที่งานวิจัยนี้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยละเอียดดังตารางที่ 4-22 เป็นต้น

4) สรุป

การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ภายในประเทศพบว่า ปริมาณการใช้พลังงานและลำดับการใช้พลังงานจากมากไปน้อยมีความใกล้เคียง และสอดคล้องกับงานวิจัยนี้โดยเฉพาะการใช้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่เหมือนกัน รวมถึงการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่เหมือนกัน แต่ค่าพลังงานสุทธิและค่าอัตราส่วนทางพลังงานนั้นมีความแตกต่างกับงานวิจัยนี้เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการคำนวณ

พลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ (Energy output) มีความแตกต่างกัน ส่วนการเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่างประเทศพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงทั้งด้านปริมาณ และลำดับการใช้พลังงาน

4.5 การประเมินผลและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำ (Water consumption)

4.5.1 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบแห้ง (Dry process)

การใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไบโอดีเซลตั้งแต่ การปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม การขนส่ง และโรงงานผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) พบว่ามีการใช้น้ำเท่ากับ 23.64 m^3/L โดยขั้นตอนหลักในการใช้น้ำมาจากขั้นตอนการปลูกปาล์ม เพราะพืชต้องการน้ำเป็นปริมาณมากในการเจริญเติบโตตั้งแต่ การเพาะต้นอ่อน การเลี้ยงดูจนกระทั่งให้ผลผลิต และสิ้นสุดอายุการเก็บเกี่ยว ซึ่งใช้น้ำมากถึง 23.56 m^3/L หรือร้อยละ 99.66 ดังตารางที่ 4-23 รองลงมาคือขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำมันปาล์ม และการผลิตไบโอดีเซลมาจากน้ำประปา ซึ่งการจะผลิตน้ำประปาได้ 1 ลิตรต้องใช้น้ำดิบถึง 2.42 ลิตร (Botto S., 2009) อีกทั้งโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งคือใช้วิธีการกลั่นเป็นหลัก จึงใช้น้ำปริมาณน้อย และส่งผลให้การผลิตน้ำมันปาล์มใช้น้ำปริมาณมากกว่าการผลิตไบโอดีเซล ส่วนขั้นตอนการขนส่งมีการใช้น้ำมันดีเซลเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งการผลิตปิโตรเลียมก็มีการใช้เช่นกัน โดยเฉพาะใช้น้ำในการหล่อเย็นในกระบวนการผลิต เมื่อพิจารณาในรายละเอียดดังตารางที่ 4-25 ซึ่งแบ่งน้ำที่ใช้ออกเป็น 3 ประเภทคือ กรีนวอร์เตอร์ บลูวอเตอร์ และเกรย์วอเตอร์ การผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตใช้กรีนวอเตอร์ 12.63 m^3/L บลูวอเตอร์ 2.40 m^3/L เกรย์วอเตอร์ 8.61 m^3/L

ในขั้นตอนการเพาะปลูกปาล์ม แหล่งที่มาของน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูกส่วนใหญ่มาจากน้ำฝน ซึ่งน้ำฝนเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติเพราะฉะนั้นน้ำฝนจึงเป็นน้ำที่ไม่มีต้นทุน แต่เนื่องจากฝนตกตามฤดูกาล ดังนั้นการปลูกปาล์มส่วนหนึ่งจึงต้องพึ่งพาน้ำจากชลประทานเช่นกัน เกรย์วอเตอร์ของขั้นตอนการปลูกปาล์มมีค่าสูงกว่าบลูวอเตอร์เพราะ มีการใช้ปุ๋ยเพื่อการเกษตร โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน ทำให้สามารถเกิดการชะล้างไนโตรเจนกลายเป็นน้ำเสียไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาวะพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนผิดปกติ (Eutrophication หรือ algae bloom) ขั้นตอนการขนส่งไม่มีการใช้กรีนวอเตอร์หรือน้ำฝน แต่มีการใช้น้ำบลูวอเตอร์ ซึ่งอาจมาจากน้ำประปา น้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดิน เมื่อมีการใช้น้ำในการผลิตเพราะฉะนั้นก็ก่อน้ำเสียเช่นกัน จึงมีเกรย์วอเตอร์เกิดขึ้น ขั้นตอนผลิตน้ำมันปาล์ม มีการใช้น้ำจากน้ำฝน และน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติอื่นๆ เนื่องจากค่าการได้มาซึ่งไฟฟ้าอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัย

ต่างประเทศโดยการผลิตไฟฟ้าได้มาจากพลังงานน้ำ ถ่านหิน ปิโตรเลียม นิวเคลียร์ เป็นต้น ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลใช้น้ำจากระบบประปาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถือว่าเป็นบลูวอเตอร์ อีกทั้งค่าการได้มาซึ่งไฟฟ้า และสารเคมีนั้นมีค่าสูง ส่วนเกรย์วอเตอร์หลักๆ เกิดจากการได้มาซึ่งน้ำมันเตา และน้ำมันดีเซล

โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) มีปริมาณการใช้น้ำภายในโรงงานเท่ากับ 12.24 L-water/L จากภาพที่ 4-13 น้ำส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน เพราะแหล่งรวมวัตถุดิบหลักๆ โดยเฉพาะเมทานอลนั้นมีการใช้เป็นปริมาณมากในการผลิตและมีค่าการได้มาซึ่งเมทานอลสูงถึง 20 L/kg รองลงมาคือกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ร้อยละ 25.29 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ร้อยละ 24.81 และการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ร้อยละ 5.29 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการใช้น้ำขึ้นกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการผลิตไฟฟ้ามีการใช้น้ำในปริมาณมาก โดยเรียงลำดับการใช้ไฟฟ้าจากมากไปน้อยคือ การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ และการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ ตามลำดับ นอกจากนี้กรณีการใช้น้ำประปาก็เป็นเหตุให้ใช้น้ำปริมาณมากขึ้นเช่นกัน โดยการผลิตน้ำประปา 1 ลิตร ต้องใช้น้ำ 2.42 ลิตร (Botto S., 2009) เมื่อพิจารณาในรายละเอียดซึ่งแบ่งประเภทน้ำดังตารางที่ 4-26 ในแต่ละกระบวนการมีใช้บลูวอเตอร์เช่น น้ำประปา เป็นแหล่งน้ำหลักในการผลิต มีการใช้กรีนวอเตอร์หรือน้ำฝนสำหรับการผลิตไฟฟ้า ส่วนเกรย์วอเตอร์ใช้ในการผลิตไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณน้ำที่ใช้ภายในโรงงานโดยตรงพบว่าใช้น้ำเพียง 0.0043 L-water/L เท่านั้น ซึ่งถือว่าใช้น้ำปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เนื่องจากวิธีหลักที่ใช้ในการผลิตคือ การกลั่น โดยการกลั่นจะใช้น้ำน้อยแต่ใช้พลังงานมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า โรงงานซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) ในการผลิตไบโอดีเซลใช้น้ำโดยตรงในการผลิตในปริมาณที่น้อยมาก แต่เมื่อพิจารณารวมถึงการได้มาซึ่งวัตถุดิบต่างๆ พบว่ามีการใช้น้ำในปริมาณที่มากกว่าน้ำที่ใช้โดยตรงถึง 2840 เท่า เพราะการได้มาซึ่งไฟฟ้านั้นมีการใช้น้ำปริมาณมาก อีกทั้งการกลั่นใช้พลังงานสูงในการผลิตไบโอดีเซล

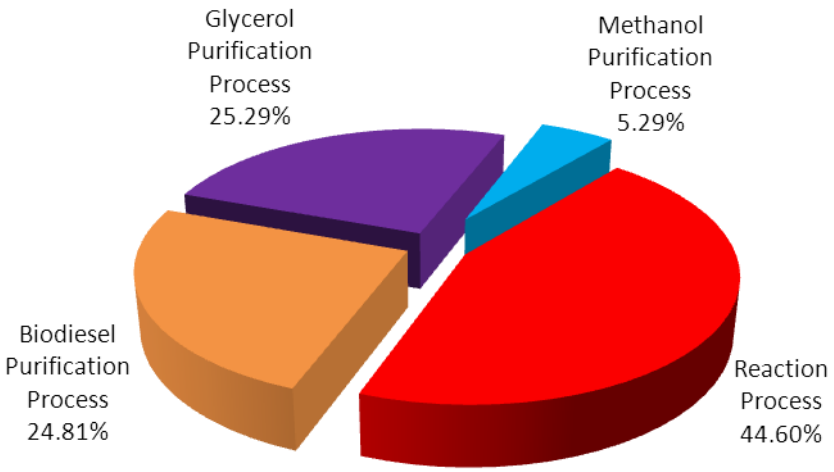
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-25 ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง

L-water/L B100	Green WF	Blue WF	Grey WF	Total	%
Oil Palm Cultivation	12631.45387	2324.18751	8606.23057	23561.87194	99.65776
FFB Transportation	0.00000	1.45867	1.45867	2.91734	0.01234
Palm Oil Mill and Refining	1.36326	64.08128	0.28676	65.73130	0.27802
Palm Stearin Transportation	0.00000	0.01249	0.01249	0.02498	0.00011
Biodiesel Production	0.35774	10.55893	1.32525	12.24192	0.05178
Total	12633.17486	2400.29889	8609.31373	23642.78748	100.00

ตารางที่ 4-26 ปริมาณการใช้น้ำของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง

L-water/L B100	Green WF	Blue WF	Grey WF	Total
Reaction Process	0.053454811	5.230988025	0.175771853	5.46021
Biodiesel Purification Process	0.123357255	2.285246827	0.628695574	3.03730
Glycerol Purification Process	0.156252523	2.565178874	0.375084984	3.09652
Methanol Purification Process	0.024671451	0.477520859	0.145693306	0.64789
Total				12.24192



ภาพที่ 4-13 ปริมาณการใช้น้ำในโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งในแต่ละกระบวนการผลิต

4.5.2 โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเปียก (Wet process)

ปริมาณการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 10.76 m^3/L โดยขั้นตอนที่ใช้น้ำปริมาณมากที่สุดคือ ขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม การผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-27 ขั้นตอนการปลูกปาล์มใช้น้ำปริมาณมากถึง 10.72 m^3/L หรือร้อยละ 99.56 โดยเฉพาะจากน้ำฝน รองลงมาเป็นน้ำสำหรับเจือจางน้ำเสีย และน้ำจากชลประทาน ตามลำดับ เกรย์วอเตอร์หรือน้ำสำหรับเจือจางน้ำเสีย เกิดจากปุ๋ยซึ่งเมื่อถูกน้ำชะจะกลายเป็นน้ำเสียไหลลงแหล่งน้ำ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มใช้น้ำปริมาณมากเนื่องจากการได้มาซึ่งน้ำประปา และไฟฟ้ามีการใช้น้ำในการผลิตสูง โดยเฉพาะจากบลูวอเตอร์เพราะ น้ำประปาผลิตจากแหล่งน้ำผิวดินเช่น แม่น้ำ และไฟฟ้าน้ำส่วนใหญ่ที่ใช้ก็มาจากแหล่งน้ำผิวดินเช่นกัน ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล โรงงานใช้น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำหลักสำหรับการผลิต จึงเป็นผลให้มีการใช้บลูวอเตอร์สูงกว่าน้ำประเภทอื่นๆ กรีนวอเตอร์ปรากฏอยู่ในการใช้น้ำภายในโรงงานเนื่องจากการผลิตไฟฟ้ามีการใช้น้ำฝน เกรย์วอเตอร์ปรากฏว่ามีอยู่ในโรงงานทั้งๆ ที่โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีระบบบำบัดน้ำเสีย และมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปใช้ในส่วนต่างๆ ของโรงงานเช่น รดน้ำต้นไม้ เป็นต้น แต่มีเกรย์วอเตอร์เนื่องจากการผลิตไฟฟ้า น้ำมันเตา และน้ำดีเซล มีการใช้น้ำและก่อน้ำเสียขึ้น

โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีปริมาณการใช้น้ำเฉพาะภายในโรงงานเท่ากับ 14.08 L-water/L จากตารางที่ 4-28 และภาพที่ 4-14 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้นมีการใช้น้ำปริมาณมากถึง 9.97 L-water/L หรือร้อยละ 70.79 โดยเป็นบลูวอเตอร์ถึง 8.56 m^3/L เพราะการได้มาซึ่งวัตถุดิบได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ ไฟฟ้า และการขนส่งวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการนี้มีการใช้น้ำปริมาณสูง โดยเฉพาะการได้มาซึ่งน้ำมันปาล์มดิบเนื่องจากต้องมีกระบวนการปลูกปาล์ม ซึ่งการปลูกพืชนั้นต้องมีการใช้ทรัพยากรน้ำเป็นปริมาณมาก จึงทำให้การใช้น้ำจากการได้มาซึ่งน้ำมันปาล์มดิบสูงตามไปด้วย อีกทั้งการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันประกอบไปด้วยหลายกระบวนการย่อย ดังนั้นจึงมีการใช้สารเคมีหลายชนิด รวมถึงพลังงานทั้งไฟฟ้า และน้ำมันเตาสูง จึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้นใช้น้ำปริมาณมาก รองลงมาคือกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันร้อยละ 22.32 โดยมีการใช้บลูวอเตอร์จำนวนมากจากการได้มาซึ่งโซเดียมเมทิลเลต และเมทานอล กรีนวอเตอร์เกิดจากการได้ซึ่งไฟฟ้า เกรย์วอเตอร์เกิดจากการได้มาซึ่งไฟฟ้า น้ำมันเตา และน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบเข้าสู่โรงงาน ในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้น้ำร้อยละ 3.09 ของปริมาณน้ำที่ใช้ภายในโรงงาน โดยแหล่งน้ำสำคัญคือ บลูวอเตอร์ ซึ่งใช้น้ำปริมาณมากกว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น (ร้อยละ 1.96) เพราะกระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลไม่มีการใช้น้ำโดยตรงในกระบวนการ ในขณะที่การทำไบโอ

ดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ จากนั้นจึงใช้น้ำมันเตาให้ความร้อนทำให้น้ำระเหยออก จะได้ไบโอดีเซลที่บริสุทธิ์ออกมา ส่วนขั้นตอนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ใช้น้ำปริมาณน้อยที่สุดเนื่องจากใช้วิธีการกลั่น โดยส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำจากการได้มาซึ่งไฟฟ้า และน้ำมันเตา

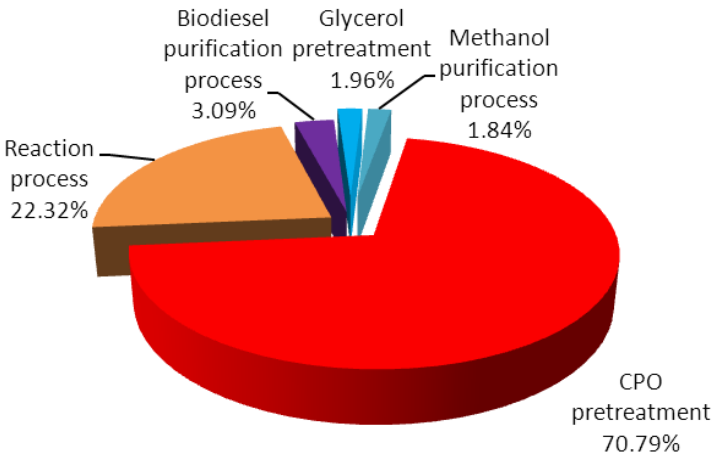
จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่า โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้น้ำจากบลูวอเตอร์เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโรงงานใช้วิธีการล้างด้วยน้ำในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ และใช้น้ำปริมาณมากในการบำบัดน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น แหล่งน้ำที่ทางโรงงานใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ คือ น้ำบาดาล ซึ่งอยู่ในขอบเขตคำนิยามของบลูวอเตอร์ จึงมีการใช้บลูวอเตอร์เป็นปริมาณมาก เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้เฉพาะภายในโรงงานโดยตรง มีการใช้น้ำบาดาลในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น และกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ซึ่งเท่ากับ 0.2 L-water/L เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่มีการคิดการได้มาซึ่งวัตถุดิบพบว่า มีการใช้น้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่ใช้โดยตรงถึง 70 เท่า

ตารางที่ 4-27 ปริมาณการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก

L-water/L B100	Green WF	Blue WF	Grey WF	Total
Oil Palm Plantation	5744.92845	1057.066836	3914.211	10716.20654
FFB Transportation	0	1.45866912	1.458669	2.917338239
Palm Oil Mill and Refining	0.62002708	29.25319821	0.13042	30.00364541
Palm Stearin Transportation	0.00000	0.12488	0.12488	0.249758834
Biodiesel Production	0.14335187	12.26255189	1.678447	14.08435106
Total	5745.69183	1100.166134	3917.604	10763.46164

ตารางที่ 4-28 ปริมาณการใช้น้ำของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก

L-water/L B100	Green WF	Blue WF	Grey WF	Total
CPO pretreatment	0.11587628	8.557714989	1.296454	9.97005
Reaction process	0.0050375	3.041146234	0.096937	3.14312
Biodiesel purification process	0.01203559	0.329616306	0.093329	0.43498
Glycerol pretreatment	0.0050375	0.17090024	0.100431	0.27637
Methanol purification process	0.00536499	0.163174125	0.091297	0.25984
Total	0.14335187	12.26255189	1.678447	14.08435



ภาพที่ 4-14 ปริมาณการใช้น้ำในโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกในแต่ละกระบวนการผลิต

4.5.3 เปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) คือ 23.64 m^3/L ส่วนของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 10.76 m^3/L เนื่องจากใช้น้ำมันปาล์มในการผลิตต่างชนิดกัน โดยการใช้น้ำมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์เกิดจากขั้นตอนการปลูกปาล์ม ซึ่งอ้างอิงข้อมูลเฉพาะเพื่อผลิตปาล์มสเตียรีนเท่านั้น โดยโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้ปาล์มสเตียรีนในการผลิต ส่วนโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้ปาล์มสเตียรีนเพียงร้อยละ 45 ของน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นวัตถุดิบทั้งหมดเท่านั้น โดยเมื่อเรียงลำดับปริมาณการใช้น้ำพบว่าทั้ง 2 โรงงานมีความสอดคล้องคือ ขั้นตอนการปลูกปาล์มใช้น้ำมากที่สุด รองลงมาเป็นการผลิตน้ำมันปาล์ม โรงงานผลิตไบโอดีเซล และการขนส่ง ตามลำดับ เนื่องจากการปลูกพืชนั้นต้องการน้ำปริมาณเพื่อใช้การเจริญเติบโต ดังนั้นการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลจึงพึ่งพาแหล่งน้ำจากฝนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการผลิตน้ำมันปาล์ม และการผลิตไบโอดีเซล มีการใช้พลังงาน สารเคมีต่างๆ รวมถึงมีหลายกระบวนการย่อย จึงเป็นเหตุให้มีปริมาณการใช้น้ำรองลงมา ส่วนขั้นตอนการขนส่งมีการใช้น้ำเพราะ การได้มาซึ่งน้ำมันดีเซลมีการใช้น้ำในขั้นตอนการผลิต สามารถสรุปได้ว่าในขั้นตอนการปลูกปาล์ม การผลิตน้ำมันปาล์ม และการขนส่ง ปริมาณการใช้น้ำจะขึ้นกับชนิดน้ำมันปาล์มซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

เมื่อพิจารณาเฉพาะภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลพบว่า โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) ใช้น้ำปริมาณ 12.24 L-water/L โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) ใช้น้ำ 14.08 L-water/L เพราะวัตถุดิบปาล์มที่ใช้แตกต่างกัน และเทคโนโลยี

แบบเปียกใช้น้ำเป็นทรัพยากรหลักในการผลิตไบโอดีเซล แต่ถ้าหากทั้ง 2 โรงงานใช้วัตถุดิบปาล์มชนิดเดียวกัน แม้ว่าเทคโนโลยีแบบเปียกมีปริมาณการใช้น้ำโดยตรงมากกว่าเทคโนโลยีแบบแห้ง แต่เมื่อพิจารณาการได้มาซึ่งวัตถุดิบต่างๆ การผลิตไฟฟ้าใช้น้ำมากถึง 113.3 L/kWh ซึ่งเทคโนโลยีแบบแห้งใช้วิธีการกลั่นเป็นหลัก จึงมีการใช้พลังงานสูงทั้งไฟฟ้า และน้ำมันเตา ทำให้มีปริมาณการใช้น้ำสูงตามไปด้วย ส่งผลให้เทคโนโลยีแบบแห้งใช้น้ำปริมาณมากกว่าเทคโนโลยีแบบเปียกได้เช่นกัน จากการเรียงลำดับปริมาณการใช้น้ำของทั้ง 2 โรงงานในแต่ละกระบวนการพบว่ามีความสอดคล้องกันคือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิ-เคชันใช้น้ำมากกว่ากระบวนการทำไบโอดีเซลและการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์หรือการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น โดยมีความแตกต่างในการเรียงลำดับเพียงเล็กน้อยคือ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้น้ำในกระบวนทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์มากกว่าการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ เนื่องจากมีการใช้วิธีการกลั่นทั้ง 2 กระบวนการ โดยแต่ละกระบวนการก็มีจำนวนหอกลั่นที่เท่ากัน แต่การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์มีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่า จึงมีการใช้ไฟฟ้าปริมาณมากกว่า ส่งผลให้มีการใช้น้ำปริมาณมากกว่าเช่นกัน ส่วนโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้น้ำในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ จึงทำให้การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำใช้น้ำปริมาณมากกว่าการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลขั้นต้น

การใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ (CPO pretreatment) โดยมีการใช้สารเคมี ใช้พลังงานสูง อีกทั้งใช้น้ำเป็นปริมาณมาก จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โรงงานผลิตไบโอดีเซลใช้น้ำจำนวนมาก ในขณะที่ถ้าใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบจะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันได้เลย ทำให้ลดการใช้น้ำจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบไปได้ปริมาณมาก

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน (Transesterification process) มีการใช้เมทานอล และโซเดียมเมทิลเลตเป็นสารเร่งปฏิกิริยา นำไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์ม ซึ่งการนำเมทานอลจากกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่ จะทำให้ช่วยลดปริมาณการใช้น้ำเนื่องจากการผลิตเมทานอลในกระบวนการนี้ได้

พิจารณาเฉพาะกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification process) วิธีการกลั่นใช้น้ำ 3.04 L-water/L ซึ่งมากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ (0.44 L-water/L) เนื่องจากการกลั่นใช้พลังงานมากกว่า ทำให้ปริมาณน้ำของการได้มาซึ่งพลังงานที่ใช้เหล่านี้สูงไปด้วย ส่งผลให้วิธีการกลั่นใช้น้ำมากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำถึง 7 เท่า หากพิจารณาปริมาณการใช้น้ำโดยตรงโดยไม่คำนึงถึงการได้มาซึ่งวัตถุดิบในกระบวนทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์นี้พบว่า วิธีการกลั่นใช้น้ำ 0.0014 L-water/L วิธีการล้างด้วยน้ำใช้น้ำ 0.0333 L-water/L ซึ่งวิธีการล้างด้วยน้ำมีการใช้น้ำมากกว่าถึง 24

เท่า เพราะวิธีการกลั่นมีการใช้น้ำเพียงเพื่อการหล่อเย็น และเพื่อการควบแน่นให้เป็นไบโอดีเซลเท่านั้น

กระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ (Glycerol purification process) (3.10 L-water/L) ใช้น้ำปริมาณมากกว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอล (Glycerol pretreatment) (0.28 L-water/L) ถึง 11 เท่า เพราะการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ต้องใช้หลายขั้นตอน โดยเฉพาะขั้นตอนการกลั่นมีการใช้หอกลั่นถึง 3 หอ ซึ่งต้องใช้พลังงานสูง ส่งผลให้ปริมาณการใช้น้ำของการได้มาซึ่งพลังงานเหล่านี้มีค่าสูงเช่นกัน ในขณะที่การปรับปรุงคุณภาพกลีเซอรอลเป็นเพียงการปรับปรุงขั้นต้นเพื่อให้ได้กลีเซอรอลดิบเท่านั้น

กระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ (Methanol purification process) ใช้น้ำปริมาณน้อยที่สุดเพราะ วิธีการกลั่นใช้น้ำน้อย อีกทั้งไม่มีสารขาเข้าอื่นๆ นอกจากพลังงานที่ใช้สำหรับการกลั่นเท่านั้น ซึ่งถ้ามีการนำของเสียจากการกลั่นไปผ่านกระบวนการต้มแยกน้ำออกจะทำให้ได้ไบโอดีเซลเพิ่ม แต่ก็ทำให้ใช้พลังงานปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการใช้น้ำปริมาณมากขึ้นเช่นกัน เพราะปริมาณน้ำจากการได้มาซึ่งพลังงานนั้นมีค่าสูง โดยเฉพาะจากพลังงานไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณการใช้น้ำโดยตรงภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลโดยไม่คำนึงถึงการได้มาซึ่งวัตถุดิบพบว่า เทคโนโลยีแบบแห้ง (วิธีการกลั่น) ใช้น้ำในการผลิตไบโอดีเซลเพียง 0.0043 L-water/L ส่วนเทคโนโลยีแบบเปียก (การล้างด้วยน้ำ) ใช้น้ำ 0.2 L-water/L เพราะกระบวนการบำบัดน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้นใช้น้ำปริมาณมาก ดังนั้นการกลั่นจึงเป็นวิธีลดการใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างมาก

4.5.4 เปรียบเทียบกับค่าการใช้น้ำโดยเฉลี่ยของไบโอดีเซล

ปริมาณการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลโดยเฉลี่ยของโลก ตามงานวิจัยของ Hoekstra (Hoekstra A.Y. Mekonnen M.M., 2011) ซึ่งรวบรวมข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1996 ถึง 2005 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีการใช้กรีนวอเตอร์ บลูวอเตอร์ เกรย์วอเตอร์คือ 4,975 1 และ 190 L-water/L-biodiesel ตามลำดับ ในขณะที่การใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตโดยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) มีการใช้กรีนวอเตอร์ บลูวอเตอร์ เกรย์วอเตอร์คือ 12,633 2,400 และ 8,609 L-water/L-biodiesel ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-25 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากการใช้น้ำส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการปลูกปาล์มน้ำมัน โดยงานวิจัยนี้ในส่วนของขั้นตอนการปลูกปาล์มเป็นการอ้างอิงข้อมูลงานวิจัยของประเทศไทยโดยตรง ซึ่งมีความแตกต่างทั้งด้านภูมิประเทศ ภูมิอากาศ กับงานวิจัยของ Mekonnen และ Hoekstra (2011) รวมถึงสภาพของดินในการเพาะปลูก การจัดการทางการเกษตร แหล่งน้ำที่ใช้ และผลผลิตที่ได้ ซึ่งถ้าปาล์ม

น้ำมันให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูง ปริมาณน้ำที่ใช้จะต่ำ ถ้าให้ผลผลิตต่อพื้นที่ต่ำ ปริมาณการใช้น้ำจะสูง ดังนั้นประสิทธิภาพของการใช้น้ำส่วนหนึ่งขึ้นกับผลผลิตที่ได้ ส่วนค่าเกรย์วอเตอร์ที่มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยโลกมากหลายเท่านั้น เป็นเพราะในประเทศไทยมีการใช้ปุ๋ยปริมาณมากเพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตปาล์มน้ำมันสูง โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ทำให้เมื่อฝนตกก็สามารถเกิดการชะล้างปุ๋ยซึ่งมีสารอาหารสูงลงสู่แหล่งน้ำ เป็นสาเหตุทำให้เกิดสภาวะที่พืชเจริญเติบโตผิดปกติ (Eutrophication) ส่งผลให้ออกซิเจนในน้ำลดลง และอาจทำให้เกิดน้ำเน่าเสียได้ การใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลก็อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้น้ำโดยรวมตลอดวัฏจักรชีวิตของงานวิจัยนี้สูงกว่าค่าเฉลี่ยในระดับโลก เพราะการผลิตปาล์มสเตียรีนจำนวนหนึ่ง ต้องมีการผลิตน้ำมันปาล์ม 3.45 เท่า ทำให้ต้องมีการปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

เปรียบเทียบการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตโดยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) กับค่าเฉลี่ยโลกในงานวิจัยของ Mekonnen และ Hoekstra (2011) ปริมาณการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตโดยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกมีการใช้กรีนวอเตอร์ บลูวอเตอร์ เกรย์วอเตอร์คือ 5,746 1,100 และ 3,918 L-water/L-biodiesel ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-27 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยโลก เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลภายในประเทศไทยเท่านั้น ทั้งการปลูกปาล์ม ตลอดถึงขั้นตอนการผลิตต่างๆ ซึ่งในแต่ละประเทศก็มีลักษณะภูมิอากาศ ลักษณะภูมิประเทศ ผลผลิตปาล์มน้ำมัน และกระบวนการผลิตที่มีความแตกต่างกัน ดังเหตุผลที่กล่าวในข้างต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในปัจจุบันนี้สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดภัยธรรมชาติต่างๆ ตามมามากมาย ซึ่งสาเหตุสำคัญเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนขึ้น จากงานวิจัยนี้ซึ่งมีการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2.83 $kgCO_2/L$ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 1.89 $kgCO_2/L$ รวมถึงการศึกษาลงในรายละเอียดในแต่ละกระบวนการของโรงงานผลิตไบโอดีเซล ทำให้เป็นส่วนช่วยในการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในโรงงานให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น พบว่า โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (กรณีศึกษาที่ 1) ปล่อย 0.52 $kgCO_2/L$ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (กรณีศึกษาที่ 2) ปล่อย 0.84 $kgCO_2/L$ ซึ่งทั้ง 2 โรงงานใช้วัตถุดิบปาล์มต่างชนิดกัน และเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลที่ต่างกัน ทำให้มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่างกัน

ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ต้องมีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต แต่พลังงานก็ส่งผลโดยตรงกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น การใช้พลังงานจำนวนมากนอกจากจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นแล้ว ยังส่งผลกระทบทางอ้อมแก่ทรัพยากรซึ่งต้องถูกใช้มากขึ้นเพื่อการผลิตพลังงานเหล่านั้น ดังนั้นการประหยัดพลังงานจึงสามารถช่วยในเรื่องสิ่งแวดล้อม และลดต้นทุนการผลิตให้แก่โรงงานได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาด้านการใช้พลังงานของการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) คือ 30.49 MJ/L ปริมาณการใช้พลังงานตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลซึ่งมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 18.51 MJ/L เพราะใช้วัตถุดิบปาล์มในการผลิตไบโอดีเซลต่างชนิดกัน เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้พลังงานเฉพาะภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซลพบว่า โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้ 11.47 MJ/L โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้ 9.77 MJ/L เนื่องจากเทคโนโลยีแบบแห้งใช้วิธีการกลั่น จึงใช้พลังงานมากกว่าเทคโนโลยีแบบเปียกซึ่งใช้วิธีการล้างด้วยน้ำ เมื่อพิจารณาค่าการใช้พลังงานสุทธิตลอดวัฏจักรชีวิต (NEB) โดยมีการคำนึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (95.72 MJ/L) มีค่าการใช้พลังงานสุทธิมากกว่าของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (58.42 MJ/L) เพราะผลิตภัณฑ์ที่ให้พลังงานส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยในขั้นตอนนี้หากผลิตเพื่อเป็น

ปาล์มสเตียรีนจะใช้พลังงานมากกว่าการผลิตเพื่อเป็นน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้ปาล์มสเตียรีนในสัดส่วนที่น้อยกว่าโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง ค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ (NER) ของการผลิตไบโอดีเซลตลอดวัฏจักรชีวิตของทั้ง 2 โรงงาน มีค่าใกล้เคียงกันคือ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งมีค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิเท่ากับ 4.14 และโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก 4.16 แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะไบโอดีเซลในการคำนวณค่าการใช้พลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิ โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกประหยัดพลังงานกว่าโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง นอกจากนี้ค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิยังสามารถบ่งบอกถึงความน่าลงทุน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าพลังงานสุทธิเป็นบวก และมีค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิมากกว่าหนึ่ง นั่นหมายความว่าการผลิตไบโอดีเซลมีแนวโน้มให้ผลประโยชน์ในเชิงพลังงานมากกว่าพลังงานที่ใช้ลงทุนไป ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นโครงการที่น่าลงทุน

น้ำเป็นแหล่งทรัพยากรสำคัญที่ใช้ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ตั้งการดื่มน้ำในชีวิตประจำวัน การปลูกพืช การเลี้ยงสัตว์ ตลอดจนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งในหลายๆ พื้นที่ของโลก รวมถึงประเทศไทยนั้นก็ประสบปัญหาขาดแคลนน้ำในช่วงหน้าแล้งเช่นกัน สำหรับโรงงานผลิตไบโอดีเซลก็มีการใช้น้ำ แหล่งน้ำที่ใช้ก็แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่นน้ำประปา น้ำบาดาล เป็นต้น ซึ่งการใช้น้ำอย่างประหยัดก็ส่งผลให้ช่วยลดต้นทุนในการผลิตด้วย การใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตไบโอดีเซลของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) คือ 23.64 m^3/L ของโรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) คือ 10.76 m^3/L เมื่อพิจารณาเฉพาะโรงงานผลิตไบโอดีเซล โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบแห้งใช้น้ำปริมาณ 12.24 L-water/L โรงงานผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยีแบบเปียกใช้น้ำ 14.08 L-water/L ซึ่งปริมาณการใช้น้ำมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับขั้นตอนการปลูกเป็นหลัก รวมถึงการใช้พลังงาน ชนิดน้ำที่ใช้ เป็นต้น เนื่องจากพลังงานโดยเฉพาะไฟฟ้ามีค่าการได้มาซึ่งไฟฟ้าสูง และถ้าน้ำที่ใช้เป็นน้ำประปาซึ่งไม่ใช่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้ต้องมีการใช้พลังงานจากการได้มาซึ่งน้ำประปาเช่นกัน หากพิจารณาเฉพาะกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ของทั้ง 2 โรงงาน เทคโนโลยีแบบแห้งจะใช้น้ำน้อยกว่าเทคโนโลยีแบบเปียกถึง 24 เท่า

การใช้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่ต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำมีความแตกต่างกันไปด้วย โดยการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบนั้นจะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซลน้อยกว่าการใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบ เพราะการจะผลิตปาล์มสเตียรีน 1 กิโลกรัมต้องใช้น้ำมันปาล์มดิบ 3.45 กิโลกรัม ส่งผลให้การผลิตปาล์มสเตียรีนต้องการทะลายปาล์มเป็นวัตถุดิบในปริมาณที่มากกว่าการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันปาล์มที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลก็ส่งผลต่อกระบวนการผลิตภายในโรงงานเช่นกัน

ถ้าหากใช้น้ำมันปาล์มดิบในการผลิตไบโอดีเซลจะต้องมีการเพิ่มกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น ทำให้มีการใช้ทรัพยากรต่างๆ มากขึ้น อีกทั้งก่อน้ำเสีย จึงต้องมีการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียไว้ภายในโรงงาน ซึ่งเป็นอีกสาเหตุสำคัญในการเกิดก๊าซเรือนกระจกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ รวมถึงการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น และการใช้น้ำปริมาณมากในการผลิตไบโอดีเซล

ในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification) การใช้เทคโนโลยีแบบแห้ง (Dry process) หรือวิธีการกลั่นนั้นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าการใช้เทคโนโลยีแบบเปียก (Wet process) หรือวิธีการล้างด้วยน้ำ เพราะวิธีการกลั่นใช้พลังงานสูง ทั้งพลังงานจากไฟฟ้า และพลังงานจากน้ำมันเตา โดยการได้มาซึ่งพลังงานเหล่านี้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกปริมาณมาก โดยเฉพาะจากการเผาไหม้น้ำมันเตาในกระบวนการผลิต ดังนั้นเทคโนโลยีแบบแห้งจึงใช้พลังงานมากกว่าเทคโนโลยีแบบเปียก สำหรับในด้านการใช้น้ำเทคโนโลยีแบบแห้งใช้น้ำปริมาณน้อยกว่าเทคโนโลยีแบบเปียก เพราะการกลั่นใช้น้ำน้อยมาก โดยมีปริมาณน้ำที่ใช้น้อยกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำถึง 24 เท่า ดังนั้นการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์หากใช้เทคโนโลยีแบบเปียกจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และช่วยประหยัดพลังงานภายในโรงงานผลิตไบโอดีเซล แต่หากใช้เทคโนโลยีแบบแห้งจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรน้ำในกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก

ผลิตภัณฑ์ร่วม (Co-product) ของการผลิตไบโอดีเซลคือ กลีเซอรอล การนำกลีเซอรอลมาปรับปรุงคุณภาพขั้นต้น (Glycerol pretreatment) เพื่อให้ได้กลีเซอรอลดิบจะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปริมาณการใช้พลังงาน และการใช้น้ำที่น้อยกว่าการนำกลีเซอรอลมาผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Glycerol purification) เพราะการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์มีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อน นอกจากการกำจัดสบู่ การปรับสภาพกลีเซอรอล ยังต้องนำเข้าสู่ขั้นตอนการกลั่น การกำจัดสี และการกำจัดกลิ่น ซึ่งใช้พลังงานสูงทั้งไฟฟ้า น้ำมันเตา เป็นต้น อีกทั้งต้องมีการใช้น้ำเพื่อหล่อเย็น ให้เกิดการควบแน่นหลังจากการกลั่น อย่างไรก็ตามการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ก็เป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ซึ่งทำให้โรงงานผลิตไบโอดีเซลสามารถมีรายได้เพิ่มขึ้น

โรงงานผลิตไบโอดีเซล หากแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีแรกคำนึงถึงเฉพาะการได้มาซึ่งวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำเท่านั้น (Direct impact) ส่วนอีกกรณีจะคำนึงถึงการได้มาซึ่งวัตถุดิบอื่นๆ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำของโรงงานโดยตรง (Indirect impact) พบว่ามีผลกระทบแฝงอยู่มากมาย ซึ่งมากกว่าผลกระทบโดยตรงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในด้านของปริมาณการใช้น้ำ

เทคโนโลยีสะอาด (Clean technology) เป็นกลยุทธ์ในเชิงอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยลดการใช้ทรัพยากร ทำให้เป็นการลดของเสียที่จะเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นโรงงานผลิตไบโอดีเซลที่ต้องการให้คุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในโรงงานมีคุณภาพที่ดีขึ้น ควรเลือกใช้

วัตถุดิบปาล์มที่มีความสะอาดมากกว่าเช่น ปาล์มสเตียรีน เพราะวัตถุดิบยิ่งสะอาด ก็จะเป็นการลดขั้นตอนการผลิต อีกทั้งยังเป็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ เนื่องจากไม่ต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบก่อนนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ดังนั้นสามารถนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันได้โดยตรง ยกตัวอย่างเช่น หากเดิมโรงงานผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยวิธีทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน และใช้เทคโนโลยีการล้างด้วยน้ำในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ถ้าทำการเปลี่ยนวัตถุดิบในการผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบเป็นปาล์มสเตียรีน พบว่าโรงงานสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 48 ลดการใช้พลังงานได้มากถึงร้อยละ 56 และสามารถลดการใช้น้ำได้ถึงร้อยละ 73

ถ้าหากโรงงานผลิตไบโอดีเซลไม่เปลี่ยนวัตถุดิบในการผลิต จากงานวิจัยนี้พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำ โดยส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 60 อยู่ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบขั้นต้น (Crude palm oil pretreatment) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการขจัดยางเหนียว การฟอกสี การขจัดกลิ่น และขั้นตอนทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ริฟิเคชัน โรงงานต้องนำน้ำมันปาล์มดิบผ่านขั้นตอนเหล่านี้ก่อนเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน โดยไม่สามารถปรับเปลี่ยนวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบได้ แต่โรงงานสามารถลดการใช้ทรัพยากร ลดการใช้น้ำมันปาล์มดิบ ได้โดยการนำผงฟอกสี (Bleaching earth) ที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากผงฟอกสีสามารถดูดซับทั้งโมเลกุลสี และน้ำมันปาล์มดิบได้ ทำให้มีการสูญเสียน้ำมันปาล์มดิบ (Oil loss) ปริมาณมาก ซึ่งผงฟอกสีที่ใช้งานแล้ว (Spent bleaching earth, SBE) โดยทั่วไปจะนำไปทำเป็นอาหารสัตว์ นำไปผลิตคอนกรีต หรือนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ หรือเตาเผา เป็นต้น วิธีการสกัดน้ำมันจากผงฟอกสีที่ใช้งานแล้วสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) การสกัดด้วยของไหลวิกฤติยิ่งยวด (Supercritical fluid extraction) เป็นต้น (Loh S.K. และคณะ, 2006) ซึ่งหากโรงงานผลิตไบโอดีเซลทำการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากผงฟอกสีกลับมาใช้ใหม่ ก็จะเป็นการลดการใช้วัตถุดิบในการผลิตนั่นคือ น้ำมันปาล์มดิบ ทำให้เป็นการลดการใช้พลังงาน และการใช้น้ำในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ รวมถึงลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในทางอ้อมได้ อีกทั้งอาจเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้เช่นกัน

ส่วนการเลือกใช้เทคโนโลยีในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ก็ขึ้นอยู่กับแต่ละโรงงานว่ามีนโยบายหลักเป็นอย่างไร หากมีนโยบายต้องการประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เทคโนโลยีแบบเปียกซึ่งใช้วิธีการล้างด้วยน้ำก็เป็นทางเลือกที่ดีที่จะทำให้โรงงานลดการใช้พลังงาน รวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ แต่ถ้าโรงงานมีนโยบายต้องการลดการใช้ทรัพยากรน้ำ เทคโนโลยีแบบแห้งก็เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่จะทำให้โรงงานลดการใช้น้ำได้เป็นปริมาณมาก อีกทั้งของเสียจากวิธีการกลั่นก็สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ได้

เนื่องจากของเสียประกอบด้วยสารไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ดังนั้นจึงสามารถนำกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่อีกครั้ง ทำให้การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการกลั่นไม่ก่อของเสียภายในโรงงาน จึงเป็นการลดการจัดการสิ่งแวดล้อมได้ ในขณะที่วิธีการล้างด้วยน้ำ ก่อน้ำเสีย ทำให้โรงงานผลิตไบโอดีเซลต้องมีระบบบำบัด อีกทั้งวิธีการกลั่นมีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลมากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ ทำให้เป็นการลดการใช้วัตถุดิบปาล์มโดยโรงงานได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นส่งผลให้โรงงานที่ใช้วิธีการกลั่นในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มีภาพลักษณ์ที่ดีต่อสังคมในการด้านการบริหารจัดการมากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ

ในส่วนของการจัดการกลีเซอรอลซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในโรงงานผลิตไบโอดีเซล แม้ว่าการปรับปรุงคุณภาพขั้นต้นเพื่อให้ได้กลีเซอรอลดิบ (Crude glycerol) จะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำน้อยกว่าการนำกลีเซอรอลไปทำให้บริสุทธิ์ (Pure glycerol, Refined glycerol) แต่ราคาขายกลีเซอรอลดิบ (ส่งขายไปยังประเทศจีน) อยู่ที่ 380 USD/ton (OLEOLINE Limited, 2014) หรือประมาณ 11,400 บาทต่อตัน ส่วนราคาขายกลีเซอรอลบริสุทธิ์อยู่ที่ 850 USD/ton หรือประมาณ 25,500 บาทต่อตัน (OLEOLINE Limited, 2014) เพราะฉะนั้นกลีเซอรอลบริสุทธิ์สามารถสร้างรายได้ให้แก่โรงงานมากกว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์ถึง 2 เท่า

5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

การบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตไบโอดีเซลโดยรวมตลอดวัฏจักร เพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนอาจทำได้โดยลดการใช้วัตถุดิบเช่น ในขั้นตอนการปลูกปาล์มปรับเปลี่ยนมาเป็นเกษตรอินทรีย์ ลดการใช้ยาปราบศัตรูพืช ลดการใช้สารเคมี เป็นต้น ทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำได้

สำหรับโรงงานผลิตไบโอดีเซล การเลือกใช้วัตถุดิบที่สะอาดจะช่วยลดขั้นตอนการผลิต ลดปริมาณของเสียที่อาจเกิดขึ้น รวมถึงลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำได้ ส่วนเทคโนโลยีในการผลิต วิธีการกลั่นเป็นทางเลือกที่ดีในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มากกว่าวิธีการล้างด้วยน้ำ เพราะมีประสิทธิภาพสูง ของเสียจากการกลั่นสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ มีการใช้น้ำการผลิตปริมาณน้อยมาก และง่ายต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในโรงงาน ทำให้เป็นการสร้างภาพลักษณ์ที่ดีต่อโรงงานในการจัดการสิ่งแวดล้อมได้ อีกทั้งการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าจะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้น้ำมากขึ้น แต่ก็เป็นการสร้างรายได้เพิ่มเติมให้แก่โรงงานเช่นกัน จากค่าพลังงานสุทธิ และค่าอัตราส่วนทางพลังงานสุทธิของงานวิจัยนี้ก็แสดงให้เห็นว่าการผลิตไบโอดีเซลมีความคุ้มค่าในการลงทุนในเชิงพลังงาน ดังนั้นหากทำการลงทุนก่อตั้งโรงงานผลิต

ไบโอดีเซลจึงควรใช้ชนิดน้ำมันปาล์มที่สะอาดในการผลิตเช่น ปาล์มสเตียรีน โดยใช้เทคโนโลยีการกลั่นในการผลิต รวมถึงควรมีกระบวนการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ จะทำให้โรงงานมีการจัดการทั้งในด้านการผลิตและด้านสิ่งแวดล้อมได้ดี

5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้โรงงานผลิตไบโอดีเซลมีความตระหนักถึงสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้าน ทั้งด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน และการใช้ทรัพยากรน้ำ ทั้งในแง่การวิเคราะห์ตลอดวัฏจักรชีวิตของไบโอดีเซล และวิเคราะห์ภายโรงงานผลิตไบโอดีเซล แต่ธุรกิจประกอบการต่างๆ ก็มีการคาดหวังถึงกำไร ดังนั้นแนวคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์ควรมีการวิเคราะห์ในงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาเลือกวิธี หรือกระบวนการในการผลิต โดยด้านเศรษฐศาสตร์และด้านสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มที่มีความสอดคล้องกันอยู่แล้วคือ ถ้าโรงงานสามารถลดปริมาณการใช้ทรัพยากรเช่นน้ำ หรือลดการใช้พลังงาน ก็สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้โดยตรง อีกทั้งการใช้ทรัพยากรที่ลดลง ก็ส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตลดลงด้วย ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นการจัดการของเสีย รวมถึงลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศได้เช่นกัน โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จะทำให้งานวิจัยในอนาคตมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

ADEME. (2009). Energy Networks and Markets Division. *Life Cycle Assessment of* 1*st generation biofuels used in France*, 1-90.

Biomass Energy Data Book. (2011). *Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels.*

Botto S. (2009). Tap water vs Bottled water in a footprint integrated approch. *Nature Precedings*.

BP. (2013). *BP Energy Outlook* 2030.

Chavalparit O., Rulkens W.H., Mol A.P.J., and Khaodhair S. (2006). Options for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystems. *Environment, Development and Sustainability,* 8, 271-287.

Francke I.C.M., and Castro J.F.M. (2013). Carbon and water footprint analysis of a soap bar produced in Brazil by Natura Cosmetics. *Water Resources and Industry,* 1-2, 37-48.

Ghaly A.E., Dave D., Brooks M.S., and Budge S. (2010). Production of Biodiesel by Enzymatic Transesterification: Review. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology,* 6, 54-76.

Gheewala S.H., and Pleanjai S. (2009). Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied Energy,* 86, S209-S214.

Gheewala S.H., Pleanjai S., and Garivait S. (2007). Environmental Evaluation of Biodiesel Production from Palm Oil in a Life Cycle Perspective. *Asian J. Energy Environ,* 8, 15-32.

Gheewala S.H., Siangjaeo S., Unnanon K., and Chidthaisong A. (2011). Implications of land use change on the life cycle greenhouse gas emissions from palm biodiesel production in Thailand. *Energy for Sustainable Development,* 15, 1-7.

Gheewala S.H., and Silalertruksa T. (2012). Environmental sustainability assessment of palm biodiesel production in Thailand. *Energy,* 43, 306-314.

Ghobadian B., Abbaszaadeh A., Omidkhah M., and Najafi G. (2012). Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy Conversion and Management,* 63, 138-148.

Harding K.G., Dennis J.S., Blottnitz H., and Harrison S.T.L. (2007). A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel. *Journal of Cleaner Production,* 16, 1368-1378.

Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., and Mekonnen M.M. (2011). The water footprint assessment manual. *Water footprint network*.

Hoekstra A.Y., and Mekonnen M.M. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and earth system sciences,* 15, 1577-1600.

ISCC. (2011). International sustainability and carbon certification. *GHG Emissions Calculation Methodology and GHG Audit*.

James A. Kent. (2012). *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, Volume* 1 *and* 2, 12th Edition.

Johnson M. C., Palou-Rivera I., and Frank E. D. (2013). Energy consumption during the manufacture of nutrients for algae cultivation. *Algal Research*.

Leung D.Y.C., Wu X., and Leung M.K.H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy,* 87, 1083-1095.

Lin L., Cunshan Z., Vittayapadung S., Xiangqian S., and Mingdong D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy,* 88, 1020-1031.

Loh S.K., Cheng S.F., Choo Y.M., and Ma A.N. (2006). A study of residual oils recovered from spent bleaching earth: Their characteristics and applications. *American Journal of Applied Sciences*, 2063-2067.

Lora E.S., Escobar J.C., Venturini O.J., Yanez E.E., Castillo E.F., and Almazan O. (2009). Biofuels: Environment technology and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 13, 1275-1287.

Malakul P., Papong S., Chom-In T., and Noksa-nga S. (2010). Life cycle energy efficiency and potentials of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Energy Policy,* 38, 226-233.

Martins F., Varanda M.G., and Pinto G. (2011). Life cycle analysis of biodiesel production. *Fuel Processing Technology,* 92, 1087-1094.

McLaughlin S. P. (1999). Estimated Energy to Produce Common Agronomic. *Energy in Ecosystems*.

Mohd Suria Affandi Y. (1994). Selected readings on palm oil and its uses: Refining and Downstreaming Processing of Palm and Palm Kernel Oils. (Plam oil research institute of Malaysia), 35-50.

Musikavong C., Kaewmai R., and H-Kittkun A. (2012). Greenhouse gas emissions of palm oil mills in Thailand. *International Journal of Greenhouse Gas Control,* 11, 141-151.

Naik S.N., Meher L.C., and Sagar D. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 10, 248-268.

Norgate T., Haque N., Somerville M., and Jahanshahi S. (2011). THE GREENHOUSE GAS FOOTPRINT OF CHARCOAL PRODUCTION AND OF SOME APPLICATIONS IN STEELMAKING. *Proceedings of 7 th Australian Life Cycle Assessment Conference*.

OLEOLINE Limited. (2014). *Glycerine market report*, [Online 20 April 2014], http://www.oleoline.com/wp-content/uploads/products/reports/Mar2014_670448.pdf

Pacca S., Souza S.P., Avila M.T., and Borges J.L.B. (2010). Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renewable Energy,* 35, 2552-2561.

Painesis M. (2011). KEY PERFORMANCE INDICATORS. *EE-QUARRY Project*, 1-18.

Patel M., Crank M., Dornburg V., Hermann B., Roes L., Husing B., Overbeek L., Terragni F., and Recchia E. (2006). Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources. *The Brew Project*, The potential of white biotechnology.

Patel M., Eichhammer W., and Jochem E. (1998). Gross energy requirements (GER) and gross CO2 emissions for production of the organic chemical industry. *Process data for 50 chemical intermediates – An activity within the framework of the "International Network for Energy Demand Analysis: Industrial Sector (INEDIS)"*, Chapter 4.

Pradhan. A, Shrestha. D. S, McAloon. A, Yee.W, Haas M, and Duffield J. A. (2011). ENERGY LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF SOYBEAN BIODIESEL REVISITED. *American Society of Agricultural and Biological Engineers,* 54, 1031-1039.

SDWF. (2010). Calculating the Water Footprint of your local drinking water. *Operation Community Water Footprint*, Safe Drinking Water Foundation, [Online]. http://www.safewater.org/PDFS/ocwf/OCWFcalculation.pdf [10 January 2014].

TGO. (2011). Thailand Greenhouse Gas Management Organization (แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์). *Carbon footprint assessment manual for product, 3rd edition*.

TGO. (2013., April). ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกแยกตามประเภทของการบำบัดน้ำเสีย. ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (*Emission Factor)* รวบรวมมาจากข้อมูลทุติยภูมิ สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร, UPDATE: 30 เมษายน 2556.

TGO. (2013., Ecoinvent). ภาคผนวก 1 (Emission factor). *Guideline for PCR "Ceramic Roof Tile"*, [Online].http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/PCR/121.pdf [December 2013].

TGO. (2013., Nov). ค่า *Emission Factor* โดยแบ่งตามประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม, UPDATE: 29 พฤศจิกายน 2556.

Unger K., Zhang G., and Mathews R. (2013). RESULTS & LEARNING. *Water Footprint Assessment*, Tata Industrial.

USDA. (2007). Foreign Agricultural Service, Indonesia Palm Oil. *Commodity Intelligence Report*,

[Online].http://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2007/2012/Indonesia_palmoil/ [2011 May 2013].

USDA. (2013). Foreign Agricultural Service. World supply and Distribution. *Palm oil*, [Online].http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdReport.aspx?hidReportRetrievalName=Table+11%13a+Palm+Oil%13a+World+Supply+and+Distribution++&hidReportRetrievalID=710&hidReportRetrievalTemplateID=718 [711 May 2013].

Winnipeg. (2013). Emission factors in kg CO2-equivalent per unit. [Online].https://www.google.co.th/search?q=Emission+factors+in+kg+CO2-equivalent+per+unit&oq=Emission+factors+in+kg+CO2-equivalent+per+unit&aqs=chrome..69i57.1121j1120j1124&sourceid=chrome&espv=1210&es_sm=1193&ie=UTF-1128 [1110 December 2013]. .

Yang C.-J., and Jackson R.B. (2012). China's growing methanol economy and it simplications for energy and the environment. *Energy Policy,* 41, 878–884.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). ปริมาณการผลิตไบโอดีเซล (B100) ของประเทศไทย. ไบโอดีเซล, [ออนไลน์]. http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=898&Itemid=123& lang=th[811 พฤษภาคม 2556].

ดำรงค์ ศรีพระราม, ลดาวัลย์ พวงจิตร, สาพิศ ดิลกสัมพันธ์, สคาร ทีจันทึก, นรินธร จำวงศ์, ละอองดาว เถาว์พิมาย, ทิพวรรณ สังข์ทอง. (2554). การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพรวมของชนิด/กลุ่มพรรณไม้ต่างๆ. คู่มือศักยภาพของพรรณไม้สำหรับส่งเสริมภายใต้โครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาดภาคป่าไม้(องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ร่วมกับคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).

ลักขณา เจริญสุข และคณะ. (2555). การวิเคราะห์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของปาล์มน้ำมันสำหรับผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย. นวัตกรรมและการจัดการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน, ครั้งที่ 1.

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. (2547). คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์, ภายใต้โครงการ "การจัดทำฐานข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์และเหล็กกล้าเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อม". นนทบุรี.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
คุณสมบัติสารที่ใช้ในการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คุณสมบัติของสารที่ใช้ในการคำนวณ

	Material	**Value**	**Unit**
Density	Water	1	kg/L
	Fuel oil	0.98	kg/L
	Diesel	0.83	kg/L
	Wastewater	1	kg/L
	Biodiesel	0.87	kg/L
	Kerobit	0.94	kg/L
	MeOH	0.792	kg/L
	$NaOCH_3$	0.97	kg/L
	Activated Carbon	2	kg/L
Concentration	NaCl	0.1	kg/L
Fuel economy	Diesel vehicle	1.628	km/L

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวอย่างการคำนวณ

ยกตัวอย่างเช่น ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

		Amount	Unit	Emission factor	Unit	GHG emissions ($kgCO_2/L$)
Biodiesel Production Plant	**Reaction process**					
	MeOH	0.18659	kg/L B100	0.7212	$kgCO_2/kg$	0.13457
	$NaOCH_3$	0.00589	kg/L B100	4.88	$kgCO_2/kg$	0.02875
	Refeed distillation waste	0.07688	kg/L B100	1.2101660	$kgCO_2/kg$	0.09304
	Electricity	0.00685	kWh/L B100	0.6093	$kgCO_2/kWh$	0.00418
	Fuel oil	0.00707	L/L B100	0.3057	$kgCO_2/kg$	0.00212
	Fuel oil (combustion)	0.00707	L/L B100	3.1372135	$kgCO_2/kg$	0.02173
	Diesel (truck MeOH one-way load)	80.0000	km	0.053	$kgCO_2/tkm$	
	Diesel (truck MeOH one-way no load)	80.0000	km	0.5863	$kgCO_2/km$	0.00134
	Diesel ($NaOCH_3$ one-way ship load)	4020.0000	km	0.0107	$kgCO_2/tkm$	
	Diesel ($NaOCH_3$ one-way truck load)	80.00000	km	0.053	$kgCO_2/tkm$	
	Diesel ($NaOCH_3$ one-way truck no load)	80.00000	km	0.5863	$kgCO_2/km$	0.00030
	Diesel (truck fuel oil one-way load)	12.00000	km	0.053	$kgCO_2/tkm$	
	Diesel (truck fuel oil one-way no load)	12.00000	km	0.5863	$kgCO_2/km$	0.00001
	Total					**0.28602**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>จากสมการ</u>

$E_{GHG,product} = E_{GHG,raw\ material\ acquisition} + E_{GHG,production} + E_{GHG,transportation} + E_{GHG,pollution}$

$E_{production} = E_{fuel,acquisition} + E_{fuel,combustion} + E_{water} + E_{electricity}$

GHG emissions ($kgCO_2$/FU) = Activity data x Emission factor

<u>การคำนวณการได้มาซึ่งวัตถุดิบ</u>

เมทานอล (MeOH)

Activity data = 0.18659 kg/L B100

Emission factor = 0.7212 $kgCO_2$/kg

GHG emissions (MeOH) = 0.18659 x 0.7212 = 0.13457 $kgCO_2$/L B100

GHG emissions (Total raw material acquisition) $= E_{MeOH} + E_{NaOCH3} + E_{refeed\ oil}$

$= 0.13457 + 0.02875 + 0.09304$

$= 0.25636\ kgCO_2$/L B100

<u>การคำนวณการผลิต</u>

ไฟฟ้า (Electricity)

Activity data = 0.00685 kWh/L B100

Emission factor = 0.6093 $kgCO_2$/kWh

GHG emissions (Electricity) = 0.00685 x 0.6093 = 0.00418 $kgCO_2$/L B100

GHG emissions (Total production) $= E_{fuel,acquisition} + E_{fuel,combustion} + E_{water} + E_{electricity}$

$= 0.00212 + 0.02173 + 0 + 0.00418$

$= 0.02803\ kgCO_2$/L B100

<u>การคำนวณการขนส่ง</u>

เมทานอล (MeOH)

ขนส่งเมทานอลมายังโรงงาน (Load)

Activity data = 0.18659 kg/L B100

Activity data = 80 km

Emission factor = 0.053 kgCO_2/tkm

GHG emissions (Transportation to factory) = 0.18659 x 80 x 0.053 / 1000 = 0.00079 kgCO_2/L B100

ขับรถกลับจากโรงงาน (No load)

Activity data = 0.18659 kg/L B100

Activity data = 80 km/round

Emission factor = 0.5863 kgCO_2/km

Full load = 16 ton/round

GHG emissions (Transportation from factory) = 0.18659 x 80 x 0.5863 / 16 / 1000

= 0.00055 kgCO_2/L B100

GHG emissions (Transportation of MeOH) = To factory + From factory

= 0.00079 + 0.00055

= 0.00134 kgCO_2/L B100

GHG emissions (Total transportation) = $E_{MeOH} + E_{NaOCH3} + E_{Fuel\ oil}$

= 0.00134 + 0.00030 + 0.00001

= 0.00165 kgCO_2/ L B100

การบรรทุกวัตถุดิบแต่ละชนิด มีการขนส่งด้วยปริมาณสูงสุด (Full load) แตกต่างกัน ซึ่งโรงงานวีระสุวรรณ (เทคโนโลยีแบบแห้ง) ใช้รถบรรทุกขนส่งโดยสมมติให้ปริมาณสูงสุดในการขนส่งคือ 16 ตันต่อรอบ ของทุกวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่วนโรงงานบางจากไบโอฟูเอลนั้นมีการขนส่งด้วยปริมาณสูงสุด (Full load) ของแต่ละวัตถุดิบดังตารางที่ 4-13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน</u>

$E_{GHG,product}$ = $E_{GHG,raw\ material\ acquisition} + E_{GHG,production} + E_{GHG,transportation} + E_{GHG,pollution}$

= 0.25636 + 0.02803 + 0.00165 + 0

= 0.28604 kgCO_2/L B100

(ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากผลในตารางเพียงเล็กน้อยเนื่องจาก ในตารางนั้นคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft excel ซึ่งมีความละเอียดกว่า ค่าจึงอาจคลาดเคลื่อนกันได้)

สำหรับการคำนวณปริมาณการใช้พลังงาน และการใช้น้ำ ก็มีลักษณะรูปแบบการคำนวณเช่นเดียวกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของของเสียจากการกลั่นที่นำกลับไปใช้ใหม่

(Distillation waste refeed)

สมมติให้พลังงานไฟฟ้า และน้ำมันเตาที่ใช้ยังคงเหมือนเดิม เพราะใช้ถังเดียวกันไม่ว่าจะมีการนำของเสียกลับมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันใหม่หรือไม่ก็ตาม

กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

		with refeed 6525 kg/d			**without refeed**	
			kg/d	%	kg/d	%
Physical Allocation	Production	impure ester	86286	89.61	80438.66861	89.61
		impure gly	10000	10.39	9322.33139	10.39

Raw material acquisition							
	Raw material	**Quantity (kg/d)**	**quantity per product**	**unit**	**EF**	**unit**	**CO_2 ($kgCO_2$/kg im ester)**
Reaction Process	Palm stearin	73425	0.81800559	kgPalm/kg im ester	1096	$kgCO_2$ /ton	0.89653413
	CH_3OH	15836	0.17642406	kgMeOH/kg im ester	0.7212	$kgCO_2$ /kg	0.127237032
	$NaOCH_3$	500	0.00557035	$kgNaOCH_3$/kg im ester	4.88	$kgCO_2$ /kg	0.027183298
	Total						1.050954459

การคำนวณการได้มาซึ่งวัตถุดิบ

Palm stearin

Activity data = quantity per product

= quantity x %impure ester / impure ester

= 73425 x (89.61%) / 80438.66861

= 0.818 kgPalm stearin/ kg impure ester

Emission factor = 1096 kgCO_2/ton

GHG emissions (kgCO_2/FU) = Activity data x Emission factor

GHG emissions (Palm stearin) = 0.818 x 1096 / 1000 = 0.89653 kgCO_2/kg impure ester

GHG emissions (Total raw material acquisition) = $E_{Palm\ stearin} + E_{MeOH} + E_{NaOCH3}$

= 0.89653 + 0.12724 + 0.02718

= 1.05095 kgCO_2/ kg impure ester

Production								
Reaction process	Raw material	quantity	unit	quan per product	unit	EF	unit	CO_2 (kgCO_2/kg im ester)
	electric	581.646	kWh	0.006480	kWh/kg im ester	0.6093	kgCO_2 /kWh	0.003948228
	fuel oil(raw)	600	L/d	0.006551	kg/kg im ester	0.3057	kgCO_2 /kg	0.002002558
	fuel oil (burn)	600	L/d	0.006551	kg/kg im ester	3.137213	kgCO_2 /kg	0.020551036
	Total							0.026501822

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การคำนวณการผลิต</u>

ไฟฟ้า (Electricity)

Activity data = 581.646 kWh

= quantity x %impure ester / impure ester

= 581.646 x (89.61%) / 80438.66861

= 0.00648 kWh/kg impure ester

Emission factor = 0.6093 kgCO_2/kWh

GHG emissions (Electricity) = 0.00648 x 0.6093 = 0.00395 kgCO_2/kg impure ester

GHG emissions (Total production) = $E_{fuel,acquisition}+E_{fuel,combustion}+E_{water}+E_{electricity}$

= 0.00200 + 0.02055 + 0 + 0.00395

= 0.02650 kgCO_2/kg impure ester

raw materials	By	distance (km)	EF	unit	quantity per product	unit	CO_2 (kgCO_2/kg im ester)
Palm stearin	truck 10 wheel	10	0.053	kgCO_2 /tkm	0.81800559	kgPalm/kg im ester	0.000433543
Palm stearin (no load)	truck 10 wheel	10	0.5863	kgCO_2 /km	0	kgPalm/kg im ester	0.0002997479
MeOH	truck 10 wheel	80	0.053	kgCO_2 /tkm	0.17642406	kgMeOH/kg im ester	0.0007480380
MeOH (no load)	truck 10 wheel	80	0.5863	kgCO_2 /km	0	kgMeOH/kg im ester	0.0005171871
$NaOCH_3$	ship	4020	0.0107	kgCO_2 /tkm	0.00557035	kg$NaOCH_3$/ kg im ester	0.0002396030
$NaOCH_3$	truck	80	0.053	kgCO_2 /tkm	0.00557035	kg$NaOCH_3$/ kg im ester	0.0000236183
$NaOCH_3$ (no load)	truck	80	0.5863	kgCO_2 /km	0	kg$NaOCH_3$/ kg im ester	0.0000163294
fuel oil	truck 10 wheel	12	0.053	kgCO_2 /tkm	0.006551	kg/kg im ester	0.0000041664
fuel oil (no load)	truck 10 wheel	12	0.5863	kgCO_2 /km	0	kg/kg im ester	0.0000028806
Total							0.002285114

<u>การคำนวณการขนส่ง</u>

Palm stearin

ขนส่งปาล์มสเตียรีนมายังโรงงาน (Load)

Activity data = 0.81800559 kgPalm/kg im ester

Activity data = 10 km

Emission factor = 0.053 kgCO_2/tkm

GHG emissions (Transportation to factory) = 0.81800559 x 10 x 0.053 / 1000

= 0.00043 kgCO_2/ kg im ester

ขับรถกลับจากโรงงาน (No load)

Activity data = 0.81800559 kgPalm/kg im ester

Activity data = 10 km/round

Emission factor = 0.5863 kgCO_2/km

Full load = 16 ton/round

GHG emissions (Transportation from factory) = 0.81800559 x 10 x 0.5863 / 16 / 1000

= 0.0002997 kgCO_2/ kg im ester

GHG emissions (Transportation of Palm stearin) = To factory + From factory

= 0.00043 + 0.0002997

= 0.00073 kgCO_2/ kg im ester

GHG emissions (Total transportation) = $E_{Palm\ stearin} + E_{MeOH} + E_{NaOCH3} + E_{Fuel\ oil}$

= 0.00073 + 0.001265 + 0.0002795 + 0.000007047

= 0.002285 kgCO_2/ kg im ester

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ Impure ester จากกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน</u>

$E_{GHG,product}$ = $E_{GHG,raw\ material\ acquisition} + E_{GHG,production} + E_{GHG,transportation} + E_{GHG,pollution}$

= 1.05095 + 0.02650 + 0.002285 + 0

= 1.07974 kgCO_2/ kg impure ester

Emission factor of Impure ester = 1.07974 kgCO_2/ kg impure ester

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

	Before (im ester 86286 kg/d)					After (im ester 80438.66861 kg/d)			
Ester Puri	Biodiesel	73839	kg/d	85.575	%	68835.1627	kg/d	85.575	%
	impure MeOH	5922	kg/d	6.863	%	5520.68465	kg/d	6.863	%
	refeed	6525	kg/d	7.562	%	6082.82123	kg/d	7.562	%
				100		80438.6686	kg/d	100	%

Raw material acquisition				
Raw material	**Quantity (kg/d)**	**Quan per product (kg/kg reefed)**	**Emission factor ($kgCO_2$/kg)**	**CO_2 ($kgCO_2$/kg refeed)**
impure ester	80438.66861	0.9999919265	1.079741395	1.079741395
Kerobit	0.00018	2.23773×10^{-9}	0.7344	1.64339×10^{-9}
Total				1.079741396

การคำนวณการได้มาซึ่งวัตถุดิบ

Impure ester (ส่งต่อมาจากกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน)

Activity data = quantity per product

= quantity x %refeed / refeed

= 80438.66861 x (7.562%) / 6082.82123

= 0.99999 kg impure ester/ kg reefed

Emission factor (จากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน)

= 1.07974 $kgCO_2$/ kg impure ester

GHG emissions ($kgCO_2$/FU) = Activity data x Emission factor

GHG emissions (Impure ester) = 0.99999 x 1.07974 = 1.079741 $kgCO_2$/kg refeed

GHG emissions (Total raw material acquisition) = $E_{Impure\ ester} + E_{Kerobit}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

= 1.079741 + (1.64339 x 10^{-9})

= 1.07974 kgCO_2/ kg refeed

Raw material	**Quantity**	**unit**	**Quan per product**	**unit**	**Emission factor**	**unit**	**CO_2 (kgCO_2/kg refeed)**
electric	1342.26	kWh	0.016686751	kWh/kg refeed	0.6093	kgCO_2/ kWh	0.010167237
tap water (raw)	120	kg/d	0.00149182	kg/kg refeed	0.0003	kgCO_2/ kg	4.47546 x 10^{-7}
NaCl (for demin water)	171.42857	L/d	0.000213	kgNaCl/ kg refeed	0.1933	kgCO_2/ kgNaCl	4.11955 x 10^{-5}
fuel oil (raw)	2800	L/d	0.034113	kg/kg refeed	0.3057	kgCO_2/ kg	0.010428328
fuel oil (burn)	2800	L/d	0.034113	kg/kg refeed	3.13721352	kgCO_2/ kg	0.107019597
Total							0.127656805

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การคำนวณการผลิต</u>

ไฟฟ้า (Electricity)

Activity data = 1342.26 kWh

= quantity x %refeed / refeed

= 1342.26 x (7.562%) / 6082.82123

= 0.01669 kWh/kg refeed

Emission factor = 0.6093 kgCO_2/kWh

GHG emissions (Electricity) = 0.01669 x 0.6093 = 0.01017 kgCO_2/kg refeed

GHG emissions (Total production) = $E_{fuel,acquisition}+E_{fuel,combustion}+E_{water}+E_{electricity}$

= 0.01043 + 0.10702 + (4.47546 x 10^{-7} + 0.000041)
+ 0.01017

= 0.12766 kgCO_2/kg refeed

raw materials	By	distance (km)	EF	unit	quantity per product	unit	CO_2 (kgCO_2/kg refeed)
Kerobit	Ship	17281.8	0.0107	kgCO_2 /tkm	2.23773 x 10^{-9}	kgKerobit/ kg refeed	4.13790 x 10^{-10}
Kerobit	truck	80	0.053	kgCO_2 /tkm	2.23773 x 10^{-9}	kgKerobit/ kg refeed	9.48797 x 10^{-12}
Kerobit (no load)	truck	80	0.5863	kgCO_2 /km	0	kgKerobit/ kg refeed	6.55991 x 10^{-12}
NaCl	truck	10	0.053	kgCO_2 /tkm	0.000213117	kgNaCl/kg refeed	1.12952 x 10^{-7}
NaCl (no load)	truck	10	0.5863	kgCO_2 /km	0	kgNaCl/kg refeed	7.80941 x 10^{-8}
Fuel oil	truck	12	0.053	kgCO_2 /tkm	0.034113	kg/kg refeed	2.16958 x 10^{-5}
Fuel oil (no load)	truck	12	0.5863	kgCO_2 /km	0.034113	kg/kg refeed	1.50003 x 10^{-5}
Total							3.68876 x 10^{-5}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การคำนวณการขนส่ง</u>

Kerobit

ขนส่ง Kerobit (สาร Anti-oxidant) มายังโรงงาน (Load)

Activity data = 2.23773 x 10^{-9} kgKerobit/kg refeed

Activity data (Ship) = 17281.8 km

Emission factor (Ship) = 0.0107 kgCO_2/tkm

Activity data (Truck) = 80 km

Emission factor (Truck) = 0.053 $kgCO_2$/tkm

GHG emissions (Transportation to factory) = $E_{Ship} + E_{Truck}$

$= [(2.23773 \times 10^{-9}) \times 17281.8 \times 0.0107 / 1000] +$
$[(2.23773 \times 10^{-9}) \times 80 \times 0.053 / 1000]$

$= [4.13790 \times 10^{-10}] + [9.48797 \times 10^{-12}]$

$= 4.23278 \times 10^{-10}$ $kgCO_2$/ kg refeed

ขับรถกลับจากโรงงาน (No load)

Activity data = 2.23773×10^{-9} kgKerobit/kg refeed

Activity data (Truck) = 80 km/round

Emission factor = 0.5863 $kgCO_2$/km

Full load = 16 ton/round

GHG emissions (Transportation from factory) $= 2.23773 \times 10^{-9} \times 80 \times 0.5863 / 16 / 1000$

$= 6.55991 \times 10^{-12}$ $kgCO_2$/ kg refeed

GHG emissions (Transportation of Kerobit) = To factory + From factory

$= 4.23278 \times 10^{-10} + 6.55991 \times 10^{-12}$

$= 4.29838 \times 10^{-10}$ $kgCO_2$/ kg refeed

GHG emissions (Total transportation) $= E_{Kerobit} + E_{NaCl} + E_{Fuel\ oil}$

$= (4.29838 \times 10^{-10}) + [(1.12952 \times 10^{-7}) + (7.80941 \times 10^{-8})] +$
$[(2.16958 \times 10^{-5}) + (1.50003 \times 10^{-5})]$

$= 3.68876 \times 10^{-5}$ $kgCO_2$/ kg refeed

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ Distillation Waste Refeed จากกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์</u>

$E_{GHG,product} = E_{GHG,raw\ material\ acquisition} + E_{GHG,production} + E_{GHG,transportation} + E_{GHG,pollution}$

$= 1.07974 + 0.12766 + 3.68876 \times 10^{-5} + 0$

$= 1.20744$ $kgCO_2$/ kg reefed

Emission factor of distillation waste refeed = 1.21 $kgCO_2$/ kg refeed

จากวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถนำมาใช้หาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ MeOH refeed ของโรงงานบางจากไบโอฟูเอลจากกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์ ปริมาณการใช้พลังงานของ Distillation waste refeed ของโรงงานวีระสุวรรณ (จากกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์) และปริมาณการใช้พลังงานของ Refeed MeOH ของโรงงานบางจากไบโอฟูเอล (จากกระบวนการทำเมทานอลให้บริสุทธิ์) ซึ่งจากการคำนวณดังกล่าวได้ผลดังนี้

Emission factor of distillation waste refeed = 1.21 kgCO_2/ kg distillation waste refeed

Emission factor of MeOH refeed = 1.55 kgCO_2/ kg MeOH refeed

Energy factor of distillation waste refeed = 2.36 MJ/kg distillation waste refeed

Energy factor of MeOH refeed = 7.48 MJ/kg MeOH refeed (pure MeOH)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิรินทร์ กิตติธรรมวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนหล่มสักวิทยาคม อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET’ 2014) จัดที่โรงแรม Bayview ประเทศสิงคโปร์ ในวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University