นวัตกรรมน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็ก
และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

นายศุภฤกษ์ อร่ามกิจโพธา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# Innovation of low sulfur fuel oil from blends of microalgae pyrolysis oil and used lubricating oil.

Mr. Suppalerk Aramkitphotha

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Technopreneurship and Innovation Management
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | นวัตกรรมน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว |
| โดย | นายศุภฤกษ์ อร่ามกิจโพธา |
| สาขาวิชา | ธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร. เฉลิมพร เย็นเยือก |

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนูญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. เฉลิมพร เย็นเยือก)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มงคลชัย วิริยะพินิจ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. กันย์ กังวานสายชล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ศุภฤกษ์ อร่ามกิจโพธา : นวัตกรรมน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Innovation of low sulfur fuel oil from blends of microalgae pyrolysis oil and used lubricating oil.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. เฉลิมพร เย็นเยือก, 193 หน้า.

น้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กเป็นทางเลือกของเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่สามารถนำไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เนื่องจากมีค่าความร้อนที่ดีและมีปริมาณกำมะถันต่ำ ส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของเชื้อเพลิงทดแทนที่มีราคาต่ำและเป็นขยะอันตรายที่มีการสนับสนุนให้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ จากที่องค์กรทางทะเลระหว่างประเทศประกาศให้มีการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ (กำมะถันน้อยกว่า 0.5% โดยน้ำหนัก) ในการขนส่งทางเรือ มีผลบังคับใช้ในวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2563 และการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและกระบวนการในการผลิต ผู้วิจัยพบว่าการผสมน้ำมันระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว มีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำเพื่อตอบสนองความต้องการในอนาคต ในงานวิจัยนี้เลือกน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตจากสาหร่ายสไปรูลิน่าเนื่องจากการเก็บเกี่ยวที่ง่ายและได้ผลผลิตน้ำมันสูง โดยนำสาหร่ายแห้งมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วได้จากโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยกระบวนการตกตะกอนและกรองเพื่อแยกน้ำและสิ่งปนเปื้อนออก น้ำมันทั้ง 2 ชนิดถูกผสมด้วยอัตราส่วน 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ISO 8217 ซึ่งเป็นมาตรฐานของน้ำมันเตาที่ใช้ในเรือขนส่ง

ผลการศึกษาที่ได้ พบว่าการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กในอัตราส่วน 20% และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในอัตราส่วน 80% ซึ่งเรียกในงานวิจัยนี้ว่า MLB20 มีความเป็นไปได้ในการใช้ผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำในเชิงพาณิชย์มากที่สุด โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้ ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส 910.9 kg/m$^3$ ความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส 87.26 mm$^2$/s ปริมาณกำมะถัน 0.461% โดยน้ำหนัก ปริมาณขี้เถ้า 0.515% โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำ 4.1% โดยน้ำหนัก และค่าความเป็นกรด 5.4 mg KOH/g โดยพบว่า MLB20 มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 ทั้งหมด ยกเว้นเพียงปริมาณขี้เถ้า ปริมาณน้ำและค่าความเป็นกรด ซึ่งสามารถนำไปใช้พัฒนาในงานวิจัยในเชิงพาณิชย์ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5587810220 : MAJOR TECHNOPRENEURSHIP AND INNOVATION MANAGEMENT
KEYWORDS: MICROALGAE / PYROLYSIS / USED LUBRICATING OIL / BLENDING / LOW SULFUR FUEL OIL / RESIDUAL MARINE FUELS / ECONOMIC EVALUATION

SUPPALERK ARAMKITPHOTHA: Innovation of low sulfur fuel oil from blends of microalgae pyrolysis oil and used lubricating oil.. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., CO-ADVISOR: CHALERMPORN YENYUAK, Ph.D., 193 pp.

Microalgae pyrolysis oil (MPO) is one of the most promising alternative renewable fuel to replace fossil fuel oil due to its high heating value, low sulfur content and environmentally sustainable production. Used lubricating oil (ULO) is another attractive alternative fuel with low cost. It is classified as hazardous waste that is encouraged to be recycled. The International Maritime Organization (IMO) has mandated the use of low sulfur fuel oil (LSFO) (sulfur <0.5% m/m) for marine transportation in 2020. While the world is still facing the cost and process challenges of LSFO production from fossil source, the blends of MPO and ULO have the opportunity to meet specification and satisfy the growing LSFO demand. MPO was derived from Spirulina platensis specie due to the ease of harvesting and high yield of pyrolysis oil. The dried algae were fed into a continuous pyrolysis reactor to produce the pyrolysis oil, from which MPO is extracted. ULO from vehicle engine was obtained from the vehicle service center and treated by flocculating and filtering. The blends were prepared to 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 and 0:100 of MPO and ULO ratios and tested for properties in accordance to ISO 8217 residual marine fuels. The result of testing demonstrates that the blend of 20% MPO and 80% ULO, termed Microalgae Lubricant Blend (MLB20), is a promising low sulfur marine fuel. The property tested and their result for MLB20 are as follows: 910.9 kg/m$^3$ density at 15°C, 87.26 mm$^2$/s kinematic viscosity at 50°C, 0.461 %wt. sulfur content, 0.515 %wt. ash, 4.1 %vol. water content, and a total acid number of 5.4 mg KOH/g. MLB20 met the majority of ISO 8217 specifications except for relatively high ash, acidity and water content which are challenges for future works.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | |
|---|---|---|---|
| Field of Study: | Technopreneurship and Innovation Management | Student's Signature | ..... |
| | | Advisor's Signature | ..... |
| Academic Year: | 2017 | Co-Advisor's Signature | ..... |

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาหลักเป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์ได้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. เฉลิมพร เย็นเยือก ซึ่งเป็นที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาช่วยให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อการปรับปรุงงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์ครบถ้วน

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มงคลชัย วิริยะพินิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลา ให้คำแนะนำและตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. กันย์ กังวานสายชล กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อแนวทางการวิจัย

ขอขอบพระคุณทุกๆ คนที่มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษาแนวทางในการทำงานวิจัยฉบับนี้ ไม่ว่าจะเป็น บุคลากรต่างๆ จากกลุ่มบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) บุคลากรต่างๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี, ห้องปฏิบัติการ ฝ่ายวิจัยผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีเชื้อเพลิงทางเลือก บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา, โรงงานบริษัท ไออาร์ อาร์ คอร์เปอร์เรชั่น จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และโรงงานบริษัท วังจุฬา ดีเวลลอปเมนท์ (2004) จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าผู้เป็นแรงบันดาลใจหลักให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้าย ขอขอบคุณภรรยาและบุตรของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยในทุกๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยจนแล้วเสร็จด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**สารบัญ**

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฐ
สารบัญภาพ ..... ณ
บทที่ 1 บทนำ ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 5
1.3 ขอบเขตการวิจัย ..... 6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 6
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย ..... 7
1.6 สถานที่ดำเนินการและรวบรวมข้อมูลงานวิจัย ..... 9
1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ..... 10
บทที่ 2 องค์ความรู้ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 15
2.1 เชื้อเพลิงจากชีวมวลในประเทศไทย ..... 15
2.2 สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ..... 19
2.2.1 ความเป็นมาและแนวคิดการใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นเชื้อเพลิง ..... 19
2.2.2 ขั้นตอนการเตรียมสาหร่ายเพื่อนำมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ..... 23
2.3 การผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 25
2.3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลดิบจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น ..... 26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.3.2 กระบวนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ..... 28
2.3.3 การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟคชั่น ..... 31
2.4 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย ..... 33
2.5 มาตรฐานคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิส ..... 38
2.6 การศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่าย ..... 39
2.7 สาหร่ายพันธุ์สไปรูลิน่า (Spirulina) ..... 40
2.8 ปัญหาจากน้ำมันไพโรไลซิส ..... 42
2.8.1 ปัญหาด้านคุณภาพน้ำมัน ..... 42
2.8.2 ปัญหาต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 46
2.8.3 บทสรุปการพัฒนานวัตกรรมจากน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 48
2.9 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Used Lubricating Oil) ..... 49
2.9.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil) ..... 49
2.9.2 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Used Lubricating Oil) ..... 50
2.9.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ..... 53
2.9.4 การใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงในประเทศไทย ..... 54
2.10 การศึกษาวรรณกรรมการผสมน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันประเภทต่างๆ ..... 56
2.11 น้ำมันเตากำมะถันต่ำ (Low sulfur fuel oil, LSFO) ..... 59
2.12 เชื้อเพลิงในเรือขนส่ง (Marine Fuel) ..... 62
2.12.1 Marine Gas Oil (MGO) ..... 63
2.12.2 Marine Diesel Oil (MDO) ..... 63
2.12.3 Intermediate Fuel Oil (IFO) ..... 64
2.12.4 Liquefied natural gas (LNG) ..... 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.13 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต ..... 65
2.13.1 องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต ..... 65
2.13.2 ชนิดของต้นทุนการผลิต ..... 66
2.14 การวิเคราะห์ด้านการเงินของโครงการ (Project Financial Analysis) ..... 67
2.14.1 NPV (Net Present Value) ..... 67
2.14.2 IRR (Internal Rate of Return) ..... 67
2.14.3 PB (Payback Period) ..... 68
2.15 ปัจจัยที่มีผลต่อผู้บริโภคในการยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ ..... 68
2.16 นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม (Green Innovation) ..... 69
2.17 กรอบแนวคิดการวิจัย ..... 71
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย ..... 72
3.1 การทดลองการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 72
3.2 การคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ..... 76
3.3 การศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ($C_{MPO}$) ..... 77
3.4 การศึกษาการผสมน้ำมันเพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ..... 78
3.5 การผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ..... 79
3.6 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และน้ำมันที่ได้จากการผสมกันระหว่างน้ำมันทั้ง 2 ชนิดในอัตราส่วนต่างๆ ..... 79
3.6.1 การทดสอบการเข้ากันได้ (Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test) ..... 79
3.6.2 การทดสอบคุณสมบัติตาม ISO 8217:2017 Residual marine fuels ..... 80
3.6.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ..... 81
3.6.4 ค่าความร้อน (Heating value) ..... 81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.6.5 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) ..... 82
3.6.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของไฮโดรคาร์บอน (Simulated Distillation by Gas Chromatography, SDGC) ..... 83
3.7 การศึกษาต้นทุนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ($C_{ULO}$) ..... 84
3.8 การศึกษาต้นทุนน้ำมันผสมจากน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ($C_{MLB}$) ..... 85
3.9 การศึกษาการนำนวัตกรรมไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ..... 85
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ..... 88
4.1 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ..... 88
4.2 การทดสอบการผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับ MPO เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ..... 90
4.3 การผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ..... 92
4.3.1 น้ำหนักและปริมาตรของน้ำมัน MLB ..... 92
4.3.2 การทดสอบการเข้ากันของน้ำมัน MLB ผ่าน Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test ..... 93
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมัน MLB ตามการทดสอบของ ISO 8217 Residual marine fuels ..... 93
4.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content) ..... 96
4.6 ปริมาณขี้เถ้า (Ash content) ..... 96
4.7 ปริมาณน้ำ (Water content) ..... 96
4.8 ความเป็นกรด (Acidity) ..... 97
4.9 Calculate Carbon Aromaticity Index (CCAI) ..... 97
4.10 Used Lubricating Oil: Calcium and zinc or Calcium and phosphorus ..... 97
4.11 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ..... 98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.12 ค่าความร้อน (Heating Value) ..... 98
4.13 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) ..... 99
4.14 การวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของไฮโดรคาร์บอน (Simulated Distillation by Gas Chromatography, SDGC) ..... 100
4.15 การศึกษาต้นทุนของ MPO ($C_{MPO}$) ..... 101
4.15.1 ต้นทุนของสาหร่ายแห้งแบบผง ($C_{DM}$) ..... 101
4.15.2 ต้นทุนการไพโรไลซิส ($C_P$) ..... 103
4.15.3 สัดส่วนต้นทุนของ MPO ..... 104
4.16 การศึกษาต้นทุนของ ULO ($C_{ULO}$) ..... 105
4.17 การศึกษาต้นทุนของ MLB ($C_{MLB}$) ..... 106
บทที่ 5 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ..... 107
5.1 การศึกษาตลาดเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง ..... 107
5.1.1 ตลาดเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งในปัจจุบัน ..... 107
5.1.2 การวิเคราะห์ตลาดเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งเมื่อ IMO ประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ ..... 108
5.2 ทิศทางพลังงานของโลก ..... 113
5.3 การศึกษาผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากประกาศของ IMO ..... 117
5.3.1 ผู้ผลิต ได้แก่ โรงกลั่นปิโตรเลียมต่างๆ (Refineries) ..... 117
5.3.2 ผู้จำหน่าย ได้แก่ ผู้ขายต่างๆ (Traders) ..... 118
5.3.3 ผู้ใช้ ได้แก่ เจ้าของเรือต่างๆ (Ship owners) ..... 120
5.3.4 ผู้ควบคุม ได้แก่ สำนักมาตรฐานเรือ กรมเจ้าท่า (Ship Standard Bureau, Marine department) ..... 122
5.4 การวิเคราะห์แนวโน้มราคาน้ำมันและต้นทุนของ MLB ..... 124

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

5.5 การศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ของ MLB20 ..... 125
5.5.1 การจัดตั้งบริษัท ..... 125
5.5.2 การจัดการทรัพย์สินทางปัญญา ..... 127
5.5.3 การวิเคราะห์ธุรกิจด้วย SWOT Analysis ..... 128
5.5.4 การวิเคราะห์ปัจจัยภายนอกของธุรกิจด้วย PESTEL Analysis ..... 129
5.5.5 การวิเคราะห์ธุรกิจโดย 5 Forces Model ..... 131
5.5.6 กลยุทธ์ทางการตลาด ..... 132
5.5.7 ภาพรวมของตลาดน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งในประเทศไทย ..... 134
5.5.8 การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ (Project Feasibility) ..... 135
5.5.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) ..... 140
5.5.10 ข้อเสนอแนะการดำเนินการในเชิงพาณิชย์ ..... 142
บทที่ 6 บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ ..... 144
6.1 สรุปและอภิปรายผล ..... 144
6.2 ข้อจำกัดในงานวิจัย ..... 151
6.3 ข้อเสนอแนะการวิจัยในอนาคต ..... 151
6.4 ประโยชน์ของการศึกษา ..... 152
รายการอ้างอิง ..... 154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 193

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ชีวมวลในประเทศไทยเพื่อนำมาผลิตเป็นพลังงานในปี พ.ศ. 2560 ..... 16
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเบื้องต้น และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวลแต่ละประเภท ..... 16
ตารางที่ 3 ปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนสุทธิ) ของพลังงานเชิงพาณิชย์ต่างๆ ..... 17
ตารางที่ 4 ศักยภาพน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซล ปี พ.ศ. 2558-2579 ..... 18
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายแห้งพันธุ์ต่างๆ ..... 21
ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำมันที่สะสมในสาหร่ายขนาดเล็กแห้งประเภทต่างๆ ..... 21
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบพืชที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในสหรัฐอเมริกา ..... 22
ตารางที่ 8 อุณหภูมิ เวลา และผลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่างๆ ..... 29
ตารางที่ 9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท และผลที่คาดว่าจะได้จากกระบวนการ ..... 31
ตารางที่ 10 การศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 34
ตารางที่ 11 การใช้กระบวนการต่างๆ ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 35
ตารางที่ 12 สรุปข้อมูลการแยกน้ำออกและการทำแห้ง ประสิทธิภาพกระบวนการ ความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการและต้นทุนของกระบวนการแปลงสภาพต่างๆ ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่าย ..... 35
ตารางที่ 13 การศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วของสาหร่ายประเภทต่างๆจากการศึกษาวรรณกรรม ..... 36
ตารางที่ 14 ค่าคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสเกรดต่างๆ มาตรฐาน ASTM D7544-12 ..... 38
ตารางที่ 15 เปรียบเทียบองค์ประกอบชีวเคมีของสาหร่ายประเภทต่างๆ ..... 41
ตารางที่ 16 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของสาหร่ายพันธุ์ต่างๆ ..... 42
ตารางที่ 17 ภาพรวมของคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันไพโรไลซิสจากการศึกษาวรรณกรรม ..... 43
ตารางที่ 18 การศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 19 ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่จำหน่ายในประเทศไทย ..... 55
ตารางที่ 20 การศึกษาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมน้ำมันไพโรไลซิส ..... 56
ตารางที่ 21 ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำมันเตากำมะถัน 0.1% จาก Shell ..... 59
ตารางที่ 22 D 4740 Adjunct Reference Spots (ASTM D4740 - 02) ..... 80
ตารางที่ 23 การทดสอบตาม ISO 8217 Residual marine fuels ..... 80
ตารางที่ 24 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ..... 88
ตารางที่ 25 ผลของการแยก Aqueous phase และ Oil phase ..... 90
ตารางที่ 26 ผลการศึกษาการผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับ MPO เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ..... 91
ตารางที่ 27 สรุปน้ำหนัก ปริมาตรของน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ในแต่ละอัตราส่วน ..... 92
ตารางที่ 28 สรุปคุณสมบัติของน้ำมัน MLB ตามการทดสอบของ ISO 8217 Residual marine fuels ..... 94
ตารางที่ 29 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนและก๊าซอื่นๆ ของ MLB จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ..... 98
ตารางที่ 30 ค่าความร้อนของ MLB ..... 99
ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมัน MLB ตามคาบจุดเดือดไฮโดรคาร์บอน ..... 100
ตารางที่ 32 ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง ..... 101
ตารางที่ 33 ราคาจำหน่ายสาหร่ายสไปรูลิน่าแบบผงในประเทศไทย ..... 103
ตารางที่ 34 ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายแห้งแบบผง 1 กิโลกรัม ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ..... 103
ตารางที่ 35 การคำนวณต้นทุน MLB ตามสัดส่วนการผสมต่างๆ ..... 106
ตารางที่ 36 การวิเคราะห์ SWOT ของผลิตภัณฑ์ MLB20 ..... 128
ตารางที่ 37 รายละเอียดค่าลงทุน (Initial investment) ในการผลิต MLB20 ..... 136
ตารางที่ 38 ค่าโสหุ้ยการผลิต (Overhead cost) ในการผลิต MLB ..... 137

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 39 Project feasibility study ..... 139

ตารางที่ 40 การวิเคราะห์ IRR ในการศึกษาความอ่อนไหวของค่าลงทุนและต้นทุนการผลิตทางตรงของ MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ ..... 140

ตารางที่ 41 การวิเคราะห์ NPV ในการศึกษาความอ่อนไหวของค่าลงทุนและต้นทุนการผลิตทางตรงของ MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ ..... 140

ตารางที่ 42 การวิเคราะห์ Payback ในการศึกษาความอ่อนไหวของค่าลงทุนและต้นทุนการผลิตทางตรงของ MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ ..... 141

ตารางที่ 43 การศึกษาความอ่อนไหวของราคาขายน้ำมัน MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ 141

ตารางที่ 44 ผลผลิตของกระบวนการไพโรไลซิสและราคาต้นทุนของชีวมวลต่างๆ ที่อาจนำมาใช้แทนสาหร่ายสไปรูลิน่า ..... 142

ตารางที่ 45 ประมาณการต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลประเภทอื่นๆ ที่อาจนำมาใช้ทดแทนสาหร่ายสไปรูลิน่า ..... 143

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญภาพ

รูปที่ 1 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วโลก แบ่งตามภูมิภาค ..... 1
รูปที่ 2 การปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วโลก แบ่งตามประเภทของแหล่งที่มา ..... 2
รูปที่ 3 การปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทั่วโลก ..... 3
รูปที่ 4 ระบบ Scrubber แบบ Open type ..... 13
รูปที่ 5 ระบบ Scrubber แบบ Closed type ..... 13
รูปที่ 6 ระบบ Scrubber แบบ Hybrid type ..... 14
รูปที่ 7 ปริมาณการใช้พลังงานจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 ..... 15
รูปที่ 8 สาหร่ายขนาดเล็กและการใช้ประโยชน์ ..... 20
รูปที่ 9 การแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงชีวภาพ ..... 23
รูปที่ 10 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก ..... 23
รูปที่ 11 กระบวนการแปลงชีวมวลสาหร่ายให้เป็นพลังงาน ..... 26
รูปที่ 12 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลดิบจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น ..... 27
รูปที่ 13 แผนภาพกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลและผลที่ได้ ..... 29
รูปที่ 14 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ..... 29
รูปที่ 15 ปฏิกิริยาพื้นฐานของ HTL ..... 32
รูปที่ 16 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการ HTL ..... 32
รูปที่ 17 ไดอะแกรมกระบวนการ HTL สาหร่ายขนาดเล็ก ..... 32
รูปที่ 18 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย รวมถึงค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน ..... 40
รูปที่ 19 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ..... 49
รูปที่ 20 การนำ Long Residue ไปผ่านกระบวนการกลั่นสุญญากาศเพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ..... 50
รูปที่ 21 กระบวนการรีไซเคิลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายโพรเพนและนำไปกลั่น ..... 52

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 22 วิธีต่างๆ ในการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ..... 53
รูปที่ 23 องค์ประกอบและโครงสร้างของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ..... 54
รูปที่ 24 ระบบเผาตรง (Direct Burn) ..... 55
รูปที่ 25 ราคาน้ำมัน ULSFO ช่วงปี ค.ศ. 2017-2018 ที่ Rotterdam, Netherland ..... 60
รูปที่ 26 ราคาน้ำมัน MGO ช่วงปี ค.ศ. 2017-2018 ที่ Rotterdam, Netherland ..... 61
รูปที่ 27 ราคาน้ำมัน IFO 380 ช่วงปี ค.ศ. 2017-2018 ที่ Rotterdam, Netherland ..... 61
รูปที่ 28 กระบวนการ Hydrodesulfurization ในโรงกลั่นปิโตรเลียม ..... 62
รูปที่ 29 การผลิตน้ำมันประเภทต่างๆ จากโรงกลั่นมีมีระบบ FCC และ Visbreaking ..... 63
รูปที่ 30 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ LNG ในเรือขนส่ง ..... 64
รูปที่ 31 การจำแนกต้นทุนการผลิต ..... 66
รูปที่ 32 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการยอมรับนวัตกรรม ..... 69
รูปที่ 33 นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมและผลที่ดีต่อองค์กร ..... 70
รูปที่ 34 แบบจำลองความสัมพันธ์การนำนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ในองค์กร ..... 71
รูปที่ 35 ขั้นตอนการวิจัย ..... 72
รูปที่ 36 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ..... 73
รูปที่ 37 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ..... 73
รูปที่ 38 สาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผงขนาดไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตรจากฟาร์มสาหร่ายนาทอง ..... 75
รูปที่ 39 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN 628S ..... 81
รูปที่ 40 เครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 ..... 82
รูปที่ 41 เครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น TGA701 ..... 83
รูปที่ 42 เครื่อง Gas chromatography พร้อมซอร์ฟแวร์แบบจำลองการกลั่น ของ Agilent Technologies ..... 84
รูปที่ 43 ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในกรวยแยกสาร ..... 89
รูปที่ 44 ส่วนที่เป็นน้ำมัน (ซ้าย) และส่วนที่เป็นน้ำ (ขวา) ที่ได้จากกรวยแยกสาร ..... 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

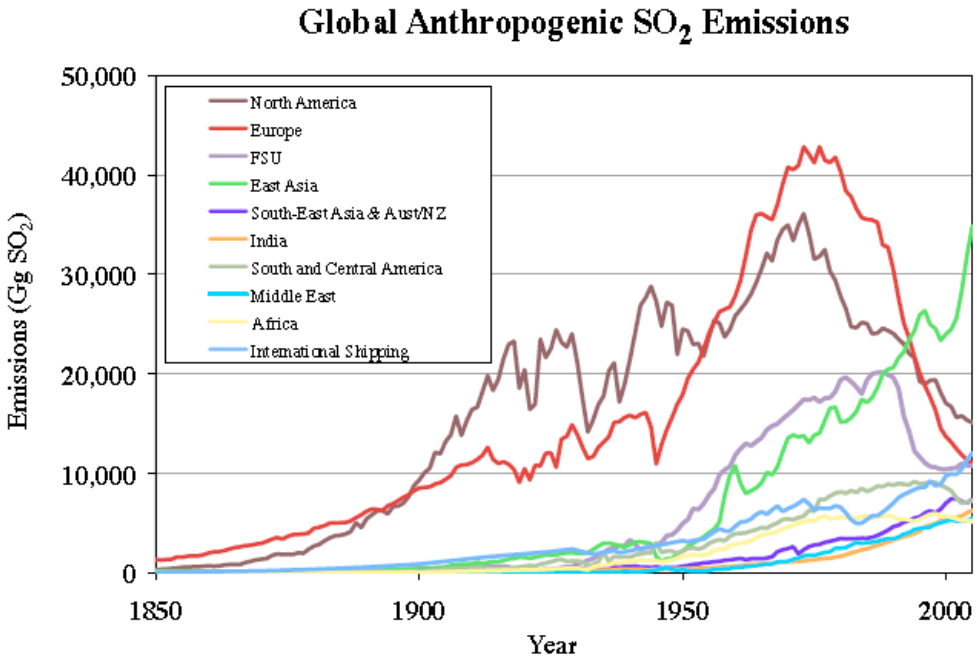
รูปที่ 45 การผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับน้ำมัน MPO ..... 91
รูปที่ 46 ผลการทดสอบ Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test .. 93
รูปที่ 47 TGA Profile ของน้ำมันผสม MLB ..... 99
รูปที่ 48 ต้นทุนของ MPO แยกตามประเภทของต้นทุน ..... 105
รูปที่ 49 ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเรือขนส่งทั่วโลกในปี ค.ศ. 2016 ..... 107
รูปที่ 50 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งแยกตามภูมิภาคในปี ค.ศ. 2016 ..... 108
รูปที่ 51 ผลการสำรวจของ Lloyds Register สำหรับทางเลือกของเจ้าของเรือขนส่งเพื่อให้ผ่านข้อกำหนดของ IMO เรื่องเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ ..... 109
รูปที่ 52 อุปสงค์และอุปทานของน้ำมันดีเซลของโลกในช่วง 2012-2021 ..... 110
รูปที่ 53 อุปสงค์และอุปทานของ HFO ในช่วง 2012-2021 ..... 110
รูปที่ 54 การคาดการณ์ตลาดของเชื้อเพลิงขนส่งก่อนและหลังประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำของ IMO ในปี ค.ศ. 2020 ..... 111
รูปที่ 55 การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในเรือขนส่งจากปี ค.ศ. 2015 และ ค.ศ. 2021 . 111
รูปที่ 56 การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันเตาในเรือขนส่งจากปี ค.ศ. 2015 และ ค.ศ. 2021 .... 112
รูปที่ 57 ระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งระบบ Scrubber เมื่อเทียบกับราคาที่แตกต่างของ MGO กับ HSFO ..... 112
รูปที่ 58 ผลตอบแทนการลงทุนใน Coker unit สำหรับโรงกลั่นปิโตรเลียม ..... 113
รูปที่ 59 ทิศทางการใช้พลังงานชนิดต่างๆ เป็นแหล่งพลังงานหลักในอนาคต ..... 114
รูปที่ 60 ทิศทางการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคต ..... 115
รูปที่ 61 ทิศทางความต้องการใช้พลังงานหลักตามภาคธุรกิจ ภูมิภาคและชนิดของพลังงาน ..... 116
รูปที่ 62 การคาดการณ์การเติบโตของพลังงานในภาคขนส่ง ..... 116
รูปที่ 63 ราคาน้ำมันดิบและราคาน้ำมันสำหรับเรือขนส่งปี ค.ศ. 2014-2018 ..... 125
รูปที่ 64 โครงสร้างการบริหารงานของบริษัท มารีน กรีน ออยล์ จำกัด ..... 127
รูปที่ 65 ส่วนแบ่งการตลาดของน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งของผู้ค้าน้ำมันรายใหญ่ในประเทศไทย 134

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

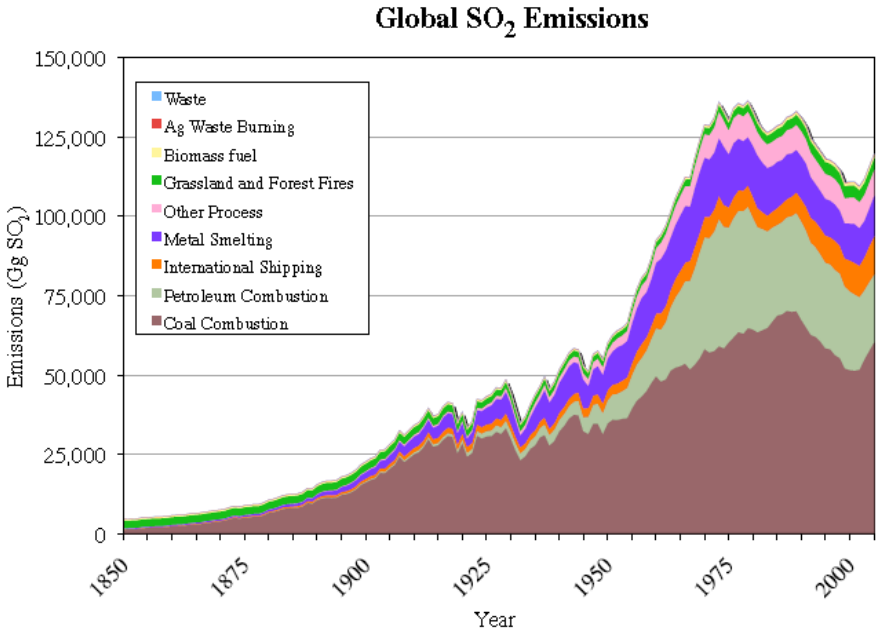
ตามที่องค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (International Maritime Organization, IMO) ได้ประกาศให้วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2563 น้ำมันเตาที่ใช้ในเรือขนส่ง (Residual marine fuels) ที่ใช้ในเรือขนส่งนอกบริเวณ Emission Control Areas (ECAs) มีปริมาณกำมะถันได้ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก โดยมีผลกับน้ำมันเตาที่ใช้ในอุปกรณ์ทุกประเภทในเรือขนส่ง ได้แก่ เครื่องยนต์หลักและเครื่องยนต์รอง (Main and Auxiliary Engine) และหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) จากปริมาณควบคุมในปัจจุบันที่ 3.5% โดยน้ำหนัก (International Maritime Organization, 2016) เพื่อลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากเรือขนส่ง ซึ่งเป็นก๊าซที่สร้างความอันตรายแก่สุขภาพของมนุษย์ต่อระบบหายใจและก่อให้เกิดฝนกรดที่ทำลายพืชผล สัตว์น้ำและทำให้เกิดความเป็นกรดในแหล่งน้ำ แม่น้ำและมหาสมุทร จากการสำรวจของ IMO ล่าสุด พบว่าปริมาณกำมะถันในน้ำมันเตา (Fuel Oil) และน้ำมันใส (Distillate Fuel) ทดสอบในปี พ.ศ. 2559 เท่ากับ 2.58% และ 0.08% โดยน้ำหนักตามลำดับ




รูปที่ 1 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วโลก แบ่งตามภูมิภาค (Smith et al., 2011)

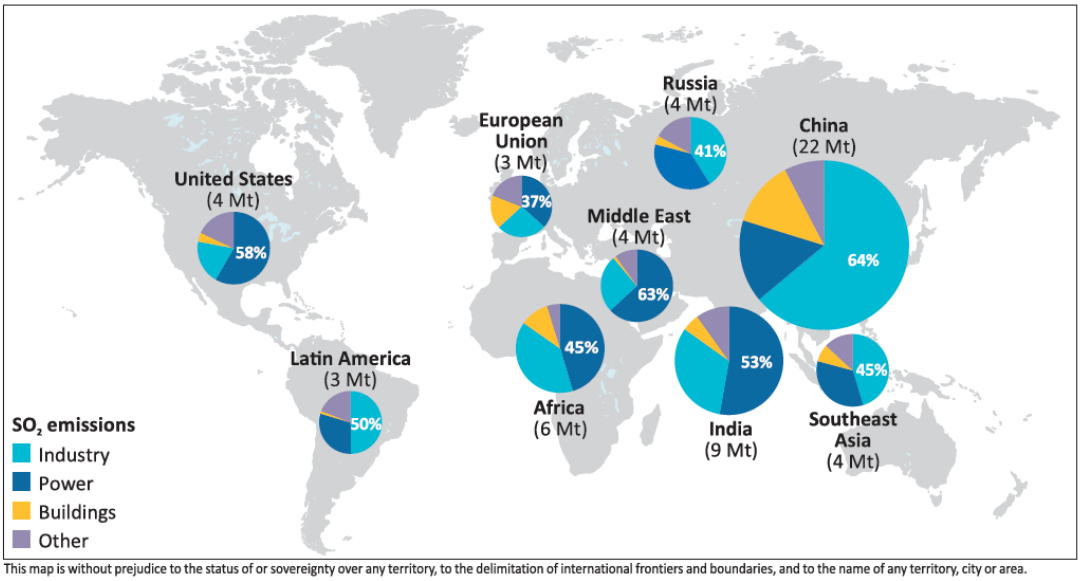
ปริมาณของการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในภูมิภาคที่มีการควบคุมลดลง ได้แก่ อเมริกาเหนือ ยุโรป แถบสหภาพโซเวียตเก่า (FSU) ขณะที่ภูมิภาคอื่นๆ กลับมีการปลดปล่อยเพิ่มมากขึ้นทุกๆปี ดังแสดงในรูปที่ 1

แหล่งที่มาของก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ในอากาศเกิดจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้วัสดุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ เช่น การผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน, น้ำมัน, แก๊สที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ การเผาไหม้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ การถลุงเหล็ก โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการดังกล่าว โดยแหล่งที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุดมาจากการเผาผลาญถ่านหินและเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ดังแสดงในรูปที่ 2




รูปที่ 2 การปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วโลก แบ่งตามประเภทของแหล่งที่มา (Smith et al., 2011)

เมื่อพิจารณาจากลักษณะการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทั่วโลกในปี พ.ศ. 2558 พบว่าในทวีปอเมริกาเหนือ ยุโรป อินเดียและตะวันออกกลางจะมาจากการผลิตไฟฟ้า ส่วนประเทศจีนและกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะมาจากอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยประเทศจีนเป็นประเทศที่มีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากที่สุด (22 ล้านตัน) และรองลงมาเป็นประเทศอินเดีย (9 ล้านตัน) ซึ่งปริมาณที่ปลดปล่อยดังกล่าว เกิดจากการใช้ถ่านหินในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3




รูปที่ 3 การปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทั่วโลก
แบ่งตามภูมิภาคและประเภท (IEA, 2016)

จากการศึกษาผลกระทบของการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์จากเรือขนส่งที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ พบว่าถ้าหากไม่มีการลดการปลดปล่อยก๊าซดังกล่าวจากเรือขนส่งภายในปี พ.ศ. 2563 แล้ว มลภาวะจากเรือขนส่งจะส่งผลให้เกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรของมนุษย์ทั่วโลกเพิ่มขึ้น 570,000 ราย ในช่วงปี พ.ศ. 2563-2568 (International Maritime Organization, 2016)

ผู้ประกอบการขนส่งมีทางเลือกในการใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำได้หลายประเภท ได้แก่ Liquefied Natural Gas (LNG), Marine Diesel Oil (MDO), Marine Gas Oil (MGO) หรือการใช้ระบบบำบัดอากาศเสีย (Scrubbers) เพื่อบำบัดก๊าซที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศจากเรือขนส่ง หรือการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ (Low sulfur fuel oil, LSFO) โดยตรง อย่างไรก็ดีปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงหรือระบบตามที่ได้กล่าวมา คือราคาที่สูงกว่าราคาของเชื้อเพลิงน้ำมันเตากำมะถัน 3.5% ในปัจจุบันที่ใช้ค่อนข้างมาก และมีแนวโน้มของราคาที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณที่ลดลงของแหล่งเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งส่งให้ผู้ประกอบการเรือขนส่งประสบปัญหาภาระต้นทุนการขนส่งที่เพิ่มขึ้น และส่งผลโดยรวมต่อภาวะเศรษฐกิจทั่วโลก นอกจากนี้ยังมีความกังวลถึงลักษณะของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ ถ้าหากมีหลากหลายระบบเช่น LNG, MDO, MGO หรือใช้การติดตั้ง Scrubber ในเรือขนส่งจะทำให้เกิดปัญหาการเติมเชื้อเพลิงที่ท่าเรือต่างๆ ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีให้เลือกนั้นอาจจะไม่สามารถใช้กับเรือขนส่งของแต่ละผู้ประกอบการได้ที่มีระบบแตกต่างกันได้ (Availability and compatibility concerns)

ในส่วนของผู้ผลิตหรือจัดจำหน่ายน้ำมันเตาให้กับเรือขนส่งในปัจจุบันต่างมีความกังวลถึงการจัดหาน้ำมันดิบที่ต้องมีปริมาณกำมะถันต่ำหรือน้ำมันดิบประเภท Sweet Crude ที่มีราคาค่อนข้างสูงและจัดหาได้ค่อนข้างยากมาผลิต และเทคโนโลยีในการกำจัดกำมะถันจากโรงกลั่นปิโตรเลียม ได้แก่ Hydrodesulfurization (HDS) Unit ที่มีราคาค่าลงทุนค่อนข้างสูง ซึ่งปัจจุบันในบริเวณ ECAs มีการควบคุมปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงแล้วให้ต่ำกว่า 0.1% โดยน้ำหนัก นับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2558 โดย IMO ซึ่งผู้ผลิตน้ำมันเตาใช้วิธีการผลิตโดยการผสมน้ำมันแก๊สออยล์กำมะถัน 0.05% (GO, 0.05%S) กับน้ำมันเตาที่มีกำมะถัน 3.5% (IFO 380, 3.5%S) เพื่อใช้ผลิตน้ำมันเตากำมะถัน 0.1% (ULSFO, 0.1%S) ออกมาจำหน่าย ซึ่งมีราคาสูงกว่าน้ำมันเตากำมะถัน 3.5% (IFO 3.5%S) ถึง 200-240 เหรียญสหรัฐต่อตันโดยประมาณ

จากการศึกษาวรรณกรรมพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาหาน้ำมันเตากำมะถันต่ำ เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวอย่างยั่งยืน ผู้วิจัยพบว่าชีวมวลมีความน่าสนใจเพื่อใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในเรือขนส่งเนื่องจากน้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณกำมะถันค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 0.5%) และสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) เป็นพืชพลังงานที่มีการศึกษาอย่างมากในต่างประเทศว่ามีศักยภาพอย่างสูงในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้ เนื่องจากสาหร่ายประกอบด้วยน้ำมันในเซลล์ค่อนข้างมาก เพาะเลี้ยงได้ง่าย เติบโตได้เร็ว ผลิตได้ในปริมาณที่ไม่จำกัด ใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อยเมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ ที่เป็นวัสดุจากการเกษตร นอกจากนี้น้ำมันที่ผลิตได้จากสาหร่ายผ่านกระบวนการแปลงสภาพ (Conversion) ต่างๆ มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ซึ่งถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีความยั่งยืนเนื่องจากสามารถผลิตได้เรื่อยๆ โดยไม่มีข้อจำกัดเหมือนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลหรือชีวมวลอื่นๆ และสาหร่ายยังช่วยลดโลกร้อนโดยการลดแก๊สเรือนกระจก (Green House Gas, GSG) จากกระบวนการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทย ทั้งภาครัฐและเอกชนมีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กหลายสายพันธุ์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตเป็นพืชพลังงาน

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเพื่อผลิตน้ำมันจากสาหร่าย เป็นกระบวนการที่สามารถจะเปลี่ยนสภาพของเซลล์สาหร่ายทั้งหมดให้ได้เชื้อเพลิง ได้แก่ ถ่านชาร์ (Charcoal) ไบโอออยล์ (Bio Oil) หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis Oil) และแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas) โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายที่ต้นทุนต่ำที่สุดเทียบกับกระบวนการอื่นๆ เช่น เอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification) ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟคชั่น (Hydrothermal Liquefaction, HTL) (Sharifzadeh et al., 2015)

อย่างไรก็ดี เมื่อศึกษาเพิ่มขึ้นพบว่าขั้นตอนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กยังพบปัญหาด้านต้นทุนการผลิตที่ยังไม่สามารถแข่งขันกับเชื้อเพลิงจากฟอสซิลได้ เนื่องจากต้นทุนของ

สารอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายและกระบวนการทำให้สาหร่ายแห้งค่อนข้างสูงจากการที่สาหร่ายต้องถูกเลี้ยงในน้ำซึ่งมีเนื้อสาหร่ายไม่เกิน 1% นอกจากนี้คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายยังไม่สามารถนำไปใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้โดยตรง เนื่องจากประกอบไปด้วยไนโตเจนและออกซิเจนเป็นจำนวนมาก มีความชื้นและความหนืดสูง และมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบ (Krutof & Hawboldt, 2016; Sharifzadeh et al., 2015; H. Yang et al., 2014) จากการศึกษาวรรณกรรมพบว่าน้ำมันชีวภาพจากสาหร่าย ถ้าหากถูกนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อผลิตน้ำมันที่มีมูลค่าสูงขึ้น เช่น น้ำมันดีเซล หรือ น้ำมันเบนซิน จะมีต้นทุนที่สูงยิ่งขึ้นไปอีก และไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้จริง

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงศึกษาเพิ่มเติมและพบว่ากระบวนการผสมน้ำมัน (Blending) เป็นทางเลือกที่สามารถนำน้ำมันหลายชนิดมาผสมกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความเหมาะสม และมีต้นทุนที่มีแนวโน้มที่จะแข่งขันได้ ซึ่งจากการศึกษาต้นทุน (Cost) คุณสมบัติ (Property) และการผสมเข้ากันได้ (Miscibility) พบว่าน้ำมันเครื่องใช้แล้ว หรือน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่าย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงเป็นการคิดค้นนวัตกรรมน้ำมันเตากำมะถันต่ำที่มีศักยภาพในเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน จากการศึกษาทดสอบทั้งคุณสมบัติและต้นทุนการผลิตการผสมกันของน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae Pyrolysis Oil, MPO) และน้ำมันเครื่องใช้แล้ว (Used Lubricating Oil, ULO) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตอบสนองกับความต้องการของโลกในด้านสิ่งแวดล้อมตามข้อกำหนดของ IMO ที่ต้องใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำในเรือขนส่งภายในวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2563 โดยให้มีคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ISO 8217 ที่เป็นมาตรฐานของน้ำมัน Residual Marine Fuels ที่ใช้ในเรือขนส่งในปัจจุบัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กกับน้ำมันเครื่องใช้แล้ว
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติตามมาตรฐาน ISO 8217 Residual marine fuels และต้นทุนการผลิตของน้ำมันเตากำมะถันต่ำที่ผลิตได้จากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันเครื่องใช้แล้ว
3. เพื่อศึกษาแนวทางการนำนวัตกรรมการผลิตที่ได้ไปสู่ธุรกิจในเชิงพาณิชย์

**1.3 ขอบเขตการวิจัย**

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา
    1) กระบวนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก งานวิจัยนี้จะศึกษาในขั้นตอนการนำสาหร่ายแห้งมาผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลผลิตของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (Yield of pyrolysis oil)
    2) กระบวนการผสมน้ำมัน งานวิจัยนี้จะศึกษาการนำน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กที่ได้จากขั้นตอนแรก มาผสมกับน้ำมันเครื่องใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากโรงงานรีไซเคิล ในอัตราการผสมต่างๆ ที่แตกต่างกัน
    3) กระบวนการทดสอบคุณภาพ งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันผสมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้ตามมาตรฐานของ ISO 8217 Residual Marine Fuels
    4) การศึกษาต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้จะศึกษาต้นทุนทางตรงของการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่าย ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ต้นทุนของสาหร่ายแห้ง ได้แก่ ค่าอาหารสาหร่าย ค่าน้ำ ค่าไฟและค่าแรงงาน และ 2) ต้นทุนของกระบวนการไพโรไลซิสในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ค่าไฟและค่าแรงงาน และศึกษาต้นทุนของน้ำมันผสมที่ได้จากสาหร่ายและน้ำมันเครื่องใช้แล้วในอัตราการผสมต่างๆ
2. ขอบเขตด้านเวลา

    การวิจัยนี้ ดำเนินขึ้นในระหว่างวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ประโยชน์ในแง่ทฤษฎี หรือความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้น (Academic Contribution)
    1) ด้านเทคโนโลยี (Technology) ได้กระบวนการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำอย่างยั่งยืนผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและการผสม (Pyrolysis and blending Process) ซึ่งสามารถนำเทคโนโลยีที่ใช้ไปเป็นแนวทางเพื่อการศึกษาต่อไป

2) ด้านนวัตกรรม (Innovation) เป็นการนำงานวิจัยที่ถูกเก็บไว้ ผลักดันให้ออกไปในเชิงพาณิชย์ ด้วยปัญหาของโลกที่มีความต้องการน้ำมันกำมะถันต่ำ สร้างนวัตกรรมด้านผลิตภัณฑ์ (Product Innovation) ให้สามารถใช้งานได้จริง

3) ด้านการจัดการ (Management) ได้ทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ตามมาตรฐานของ ISO และข้อมูลต้นทุนในกระบวนการผลิต เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาต่อไป

2. ประโยชน์ในด้านการนำไปใช้จริง (Practical Contribution)

1) ผู้เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ได้กระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายและการปรับปรุงคุณภาพจากการผสมน้ำมัน เพื่อการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

2) การผลิตเชื้อเพลิงจากสาหร่ายขนาดเล็ก ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในอากาศ ลดภาวะโลกร้อน

3) การได้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำที่ลดมลภาวะในอากาศและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีความยั่งยืน สามารถผลิตได้โดยไม่จำกัดปริมาณ และสร้างเสถียรภาพในเชิงพลังงานให้กับโลก

## 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาค้นหาวรรณกรรมและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ

1) การใช้ชีวมวลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในประเทศไทย ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการใช้ชีวมวลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนปิโตรเลียม

2) สาหร่ายขนาดเล็ก กระบวนการเลี้ยง การเก็บเกี่ยว การแยกน้ำออก การทำให้แห้ง การแปลงสภาพเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพ แนวทางการเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากสาหร่าย กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก

3) การผสมน้ำมันประเภทต่างๆ และวัตถุประสงค์ของการผสม ผลลัพธ์ที่ได้

4) น้ำมันเครื่องใช้แล้ว การเก็บรวมรวมจากศูนย์บริการ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

5) น้ำมันเตากำมะถันต่ำ กระบวนการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากโรงกลั่นน้ำมัน เชื้อเพลิงที่ใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ประกาศของ IMO ที่กำหนดให้ใช้น้ำมัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เตากำมะถันต่ำในปี พ.ศ. 2563 แนวทางการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมัน

6) ต้นทุนการผลิต การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยการผลิตน้ำมันที่ผสมได้

2. ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก

1) คัดเลือก เตรียมและจัดหาสาหร่ายขนาดเล็ก พร้อมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

2) ออกแบบการทดลองด้วยการปรับเปลี่ยนตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Temperature) ตั้งแต่ 400-600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร (Feed Rate) ตั้งแต่ 50-250 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ตั้งแต่ 50-250 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อสังเกตผลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

3) เลือกสภาวะที่ได้ผลผลิตของของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมากที่สุด เพื่อนำมาทดลองผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายเพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

4) สรุปข้อมูลผลผลิตเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กจากการทดลองจำนวน 10 ครั้ง

3. ขั้นตอนการคัดเลือกน้ำมัน ที่จะนำมาผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่าย

1) เลือกน้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเตา และมีราคาต่ำกว่าน้ำมันเตา

2) ทำการทดลองผสมน้ำมันแต่ละชนิดกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายและสังเกตถึงการผสมเข้ากันได้ (Miscibility)

3) ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันที่นำมาผสม ได้แก่ ค่าความร้อน ราคา ความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม

4) คัดเลือกน้ำมันที่มีคะแนนสูงที่สุดในหัวข้อ การผสมเข้ากันได้ ค่าความร้อน ราคา ความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายและทดสอบคุณสมบัติต่อไป

4. ขั้นตอนการผสมน้ำมัน และทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันที่ผสม

1) ผสมน้ำมันที่ได้ในข้อ 2. และ 3. ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ได้แก่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100

2) ทดสอบการเข้ากันได้ของน้ำมันด้วย The Cleanliness and Compatibility of residual fuels by spot test ตามมาตรฐาน ASTM D4740

3) ทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ตามมาตรฐานของ ISO 8217 Residual Marine Fuels

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) ทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ ของน้ำมันที่ผสมได้ ได้แก่ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D5373 ค่าความร้อนของน้ำมัน (Heating Value) ตามมาตรฐาน ASTM D5373 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) ตามมาตรฐาน ASTM E1131 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันตามจุดเดือดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตรกราฟีพร้อมซอฟแวร์แบบจำลองการกลั่น (Simulation Distillation Gas Chromatography, SDGC) ตามมาตรฐาน ASTM D2887

5. ขั้นตอนการคำนวณต้นทุนการผลิตน้ำมันที่ผสมได้
    1) การศึกษาต้นทุนทางตรงของการผลิตสาหร่ายแห้งจากการเก็บข้อมูลจากฟาร์มสาหร่าย ต้นทุนทางตรงของสาหร่ายแห้งประกอบไปด้วย ค่าสารอาหาร ค่าน้ำ ค่าไฟ และค่าแรงงาน
    2) การเก็บข้อมูลต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ ต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องประกอบไปด้วย ค่าไฟและค่าแรงงาน
    3) การศึกษาต้นทุนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากการเก็บข้อมูลจากโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว
    4) การคำนวณต้นทุนน้ำมันผสมที่ได้ในแต่ละอัตราส่วน
6. ขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ (Commercialization)
    1) การศึกษาตลาดของเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งในตลาดโลกในปัจจุบัน
    2) การศึกษาทิศทางพลังงานของโลก
    3) การศึกษาผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากประกาศของ IMO ได้แก่ ผู้ผลิต ผู้จำหน่าย ผู้ใช้ และผู้ควบคุมกฎระเบียบ
    4) การศึกษาความเป็นไปได้ทางการตลาดของน้ำมันผสมที่ได้
    5) ข้อสรุปผลการศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์
7. ขั้นตอนการสรุปและอภิปรายผล และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการทำงานวิจัยต่อไป

### 1.6 สถานที่ดำเนินการและรวบรวมข้อมูลงานวิจัย

1. ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. ห้องปฏิบัติการ ฝ่ายวิจัยผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีเชื้อเพลิงทางเลือก บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
3. โรงงานบริษัท ไออาร์อาร์ คอร์เปอร์เรชั่น จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
4. โรงงานบริษัท วังจุฬา ดีเวลลอปเมนท์ (2004) จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

**1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย**

1. IMO (International Maritime Organization )

   คือ องค์การทางทะเลระหว่างประเทศ ซึ่งเป็นตัวแทนที่ถูกจัดตั้งโดยองค์การสหประชาชาติ (United Nations, UN) จัดตั้งขึ้นในปี พ.ศ. 2502 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีในการสร้างความร่วมมือระหว่างประเทศสมาชิกในการกำหนดมาตรฐานและแนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในการเดินเรือ การคุ้มครองสิ่งแวดล้อมทางทะเล และการลดมลภาวะที่เกิดขึ้นจากการเดินเรือ รวมทั้งเพื่อเป็นกลไกในการสร้างความร่วมมือทางวิชาการระหว่างประเทศสมาชิก ปัจจุบัน IMO มีประเทศสมาชิกรวมทั้งสิ้น 173 ประเทศ

2. ECAs (Emission Control Areas)

   คือบริเวณที่ถูกควบคุมปริมาณการปลดปล่อยมลภาวะในอากาศที่ถูกกำหนดโดย Annex VI of the 1997 MARPOL Protocol (Organzation, 2005) ประกอบไปด้วย

   1) บริเวณทะเลบอลติก – ปรากฏใน Annex I of MARPOL (สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์เท่านั้น)
   2) บริเวณทะเลเหนือ – ปรากฏใน Annex V of MARPOL สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์เท่านั้น)
   3) บริเวณอเมริกาเหนือ (เริ่มมีผลวันที่ 1 สิงหาคม 2555) – ปรากฏใน Appendix VII of Annex VI of MARPOL (สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และฝุ่นละออง)
   4) บริเวณทะเลแคริบเบียนประเทศอเมริกา (เริ่มมีผลวันที่ 1 มกราคม 2557)– ปรากฏใน Appendix VII of Annex VI of MARPOL (สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และฝุ่นละออง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. MPO (Microalgae Pyrolysis Oil)

คือ น้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก โดยปกติของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมี 2 ส่วน คือส่วนที่ผสมกับน้ำ (Organic aqueous phase) และส่วนที่เป็นน้ำมัน (Oil phase) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ MPO จะเป็นส่วนที่เป็นน้ำมันเท่านั้น

4. ULO (Used Lubricating Oil)

คือ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดย ULO ที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ การตกตะกอน และการกรอง

5. MLB (Microalgae Lubricating Blend)

คือ น้ำมันผสมที่ได้จากการผสม MPO และ ULO ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

1) MLB100 คือ น้ำมัน MPO 100%
2) MLB80 คือ น้ำมัน MPO 80% และ ULO 20%
3) MLB50 คือ น้ำมัน MPO 50% และ ULO 50%
4) MLB20 คือ น้ำมัน MPO 20% และ ULO 80%
5) MLB0 คือ น้ำมัน ULO 100%

6. LSFO (Low Sulfur Fuel Oil)

คือ น้ำมันเตาที่มีปริมาณกำมะถันต่ำว่า 0.5% โดยน้ำหนัก ใช้ในธุรกิจเรือขนส่งหรือโรงไฟฟ้าเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

7. ULSFO (Ultra Low Sulfur Fuel Oil)

คือ น้ำมันเตาที่มีปริมาณกำมะถันต่ำกว่า 0.1% โดยน้ำหนัก ใช้ในธุรกิจเรือขนส่งเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

8. HSFO, HFO (High Sulfur Fuel Oil, Heavy Fuel Oil)

คือ น้ำมันเตาที่มีปริมาณกำมะถันต่ำกว่า 3.5% โดยน้ำหนัก ในปัจจุบันใช้ในเรือขนส่งเป็นหลัก มีความหนืด 180 cSt, 380 cSt และ 500 cSt

9. MGO (Marine Gas Oil)

MGO คือศัพท์ที่ใช้ในวงการเรือเดินสมุทรสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (High Speed Diesel) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลรอบหมุนเร็วที่ใช้กับยานยนต์ โดยปกติใช้สำหรับรอบหมุนที่สูงกว่า 1,000 รอบต่อนาที โดยต้องเป็นน้ำมันที่มีค่าซีเทนสูงและมีการระเหยเร็ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

10. MDO (Marine Diesel Oil )

MDO คือศัพท์ที่ใช้ในวงการเรือเดินสมุทรสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนช้า (Low Speed Diesel) ซึ่งใช้กับเครื่องยนต์รอบหมุนปานกลางหรือรอบหมุนช้า มีรอบการทำงานอยู่ที่ 500-1,000 รอบต่อนาที โดยเป็นน้ำมันที่มีค่าซีเทนไม่สูงมาก และการระเหยเป็นไปช้ากว่าน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

11. IFO (Intermediate Fuel Oil)

IFO คือน้ำมันที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง MGO กับ HFO โดยมีปริมาณของ HFO ค่อนข้างสูง ตามข้อกำหนดของ ISO 8217:2017-03 แบ่ง IFO เป็น RMB, RMD, RME, RMG และ RMK ที่ควบคุมปริมาณกำมะถันที่ 3.5% โดย IFO 180 และ IFO 380 (RMG) เป็นน้ำมันที่นิยมใช้มากที่สุดในเรือขนส่ง

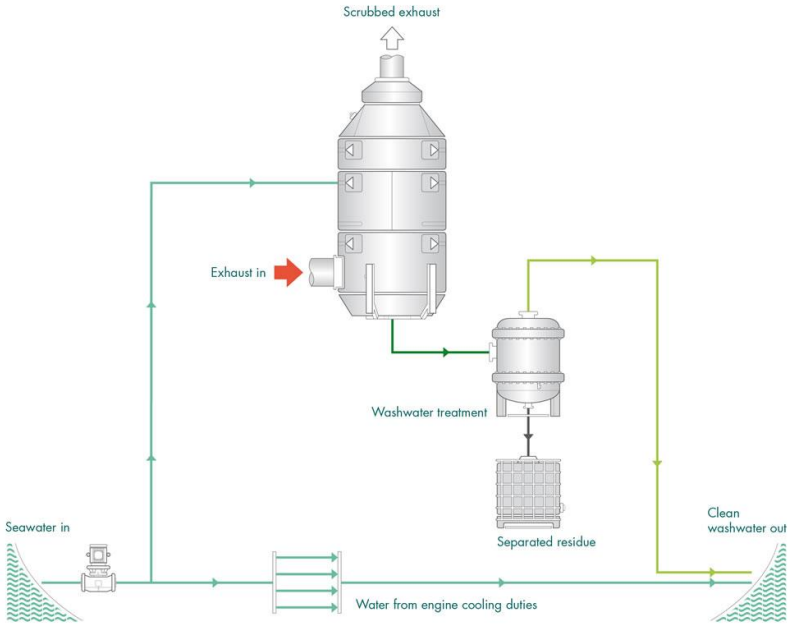
12. LNG (Liquefied Natural Gas)

LNG คือ เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติที่ถูกทำให้เป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า -162 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาตรลดลง 600 เท่าของสถานะแก๊ส เพื่อประโยชน์ในการขนส่ง และเมื่อนำมาใช้จะถูกแปลงสภาพให้เป็นแก๊สดังเดิม

13. Scrubber (ระบบบำบัดอากาศเสีย)

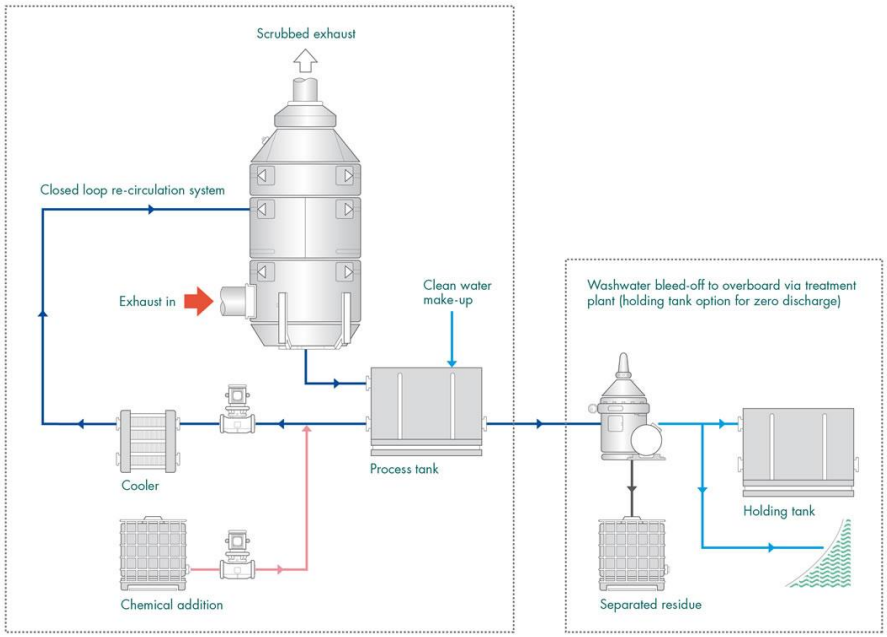
ระบบบำบัดอากาศเสีย เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งในเรือเดินสมุทรเพื่อการลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากไอเสียที่ถูกปล่อยจากเครื่องยนต์เดินเรือและหม้อต้มไอน้ำในเรือ มีหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบเปิด (Open type) โดยใช้น้ำทะเลในการบำบัดก๊าซพิษและปล่อยกลับลงสู่ทะเล (รูปที่ 4) แบบปิด (Closed type) โดยใช้สารเคมี (NaOH) ร่วมกับน้ำจืดที่ใช้ในการบำบัดก๊าซพิษ ซึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่บางส่วน และบางส่วนจะถูกบำบัดโดยโรงบำบัด (Treatment plant) ก่อนปล่อยลงสู่ทะเล โดยระบบนี้สามารถที่จะทำให้ไม่มีน้ำที่ถูกปล่อยลงทะเลเลยในช่วงระยะเวลาหนึ่งได้โดยการเก็บที่ถัง Holding tank (รูปที่ 5) และระบบไฮบริด (Hybrid type) ที่สามารถเลือกใช้ระบบเปิดที่ใช้น้ำทะเลหรือระบบปิดที่ใช้น้ำจืดได้ (รูปที่ 6)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



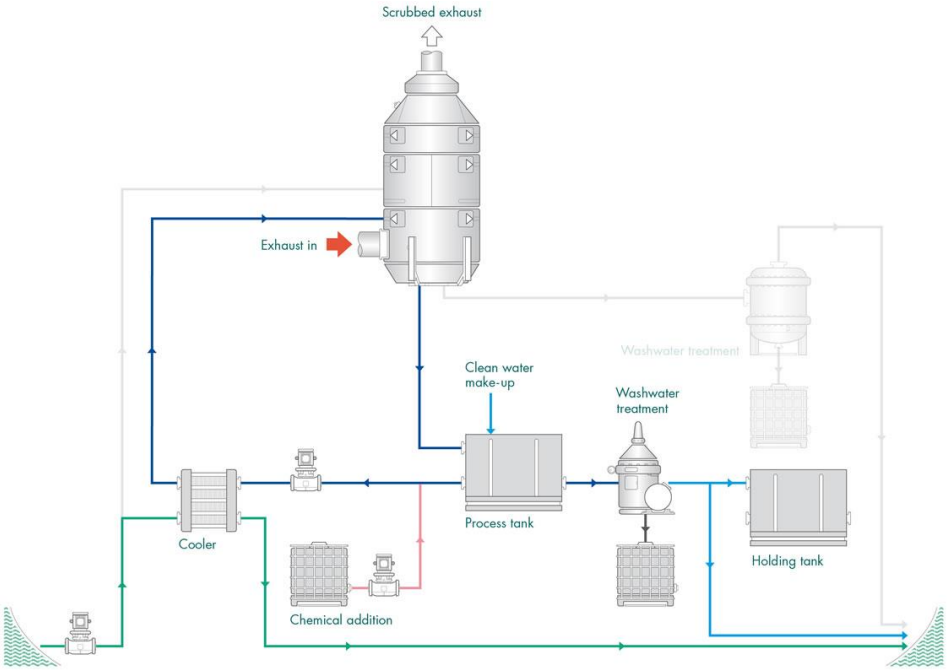

รูปที่ 4 ระบบ Scrubber แบบ Open type

(ที่มา: http://www.egcsa.com/technical-reference/what-is-an-exhaust-gas-cleaning-system/)




รูปที่ 5 ระบบ Scrubber แบบ Closed type

(ที่มา: http://www.egcsa.com/technical-reference/what-is-an-exhaust-gas-cleaning-system/)




รูปที่ 6 ระบบ Scrubber แบบ Hybrid type

(ที่มา: http://www.egcsa.com/technical-reference/what-is-an-exhaust-gas-cleaning-system/)

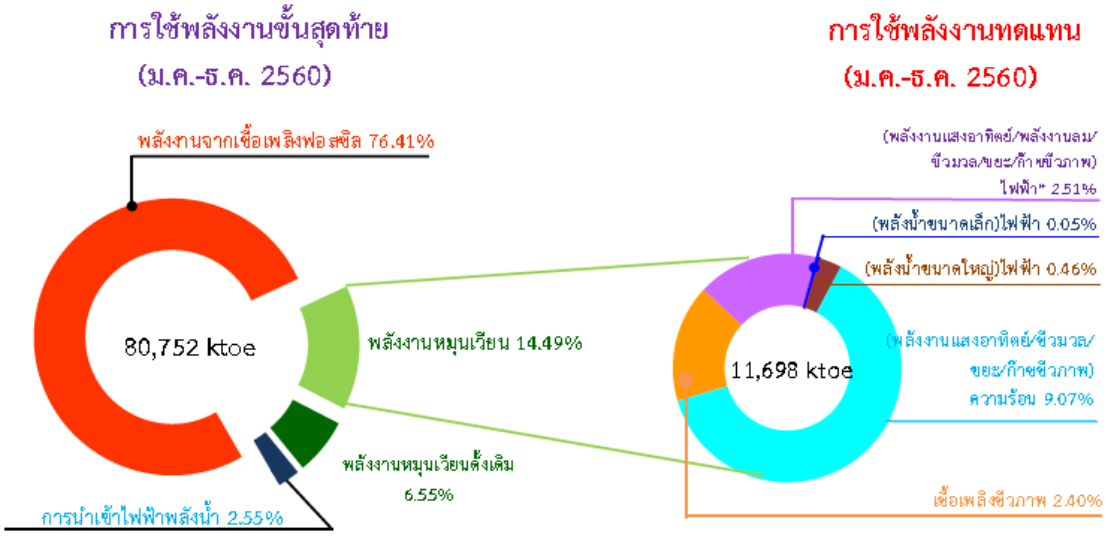
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 2
# องค์ความรู้ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 เชื้อเพลิงจากชีวมวลในประเทศไทย

จากสถิติของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน พบว่าในปี พ.ศ. 2560 มีการใช้พลังงานหมุนเวียน 11,698 พันตันเทียบเท่ากับน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.9 เมื่อเทียบกับปี 2559 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 14.49 จากการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมดในประเทศ ซึ่งแม้ว่ามีแนวโน้มการเติบโตมากขึ้นเรื่อยๆ ตามนโยบายของรัฐบาลที่มีการส่งเสริมให้ใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณการใช้พลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยยังมีความแตกต่างจากปริมาณการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลถึง 5 เท่า โดยพลังงานหมุนเวียนประกอบไปด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ขยะและชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 7

จากข้อมูลการจัดหาและการใช้พลังงานของกรมฯ ในปีเดียวกัน พบว่าปริมาณการใช้ชีวมวลเพื่อนำมาผลิตพลังงานมีทั้งสิ้น 62,974 พันตัน ซึ่งพบว่ามีการใช้กากอ้อย (Bagasse) เพื่อนำมาผลิตพลังงานมากที่สุด จำนวนทั้งสิ้น 42,629 พันตัน ดังตารางที่ 1




รูปที่ 7 ปริมาณการใช้พลังงานจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560
(ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ชีวมวลในประเทศไทยเพื่อนำมาผลิตเป็นพลังงานในปี พ.ศ. 2560
(ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

| SOLID BIOMASS | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ฟืน FUEL WOOD | แกลบ PADDY HUSK | กากอ้อย BAGASSE | วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร AGRICULTURAL WASTE | รวมชีวมวล TOTAL SOLID BIOMASS |
| (41) | (42) | (43) | (44) | (45) |
| พันตัน thousand tons | | | | |
| 605 | 3,118 | 42,629 | 16,622 | 62,974 |

จากการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวลเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย พบว่ามีชีวมวลหลายประเภทที่สามารถนำใช้ทดแทนปิโตรเลียมได้ แต่พบปัญหาเชื้อเพลิงที่ได้มียังค่าความร้อนต่ำกว่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมดังแสดงในตารางที่ 2 และตาราง 3 โดยค่าความร้อนของชีวมวลที่สูงที่สุดคือ กะลาปาล์ม ที่มีค่าความร้อน 18.27 MJ/Kg ซึ่งยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล หรือน้ำมันเตา ที่มีค่าความร้อน 36.42 MJ/Litre และ 39.77 MJ/Litre ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเบื้องต้น และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวลแต่ละประเภท
(ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม)

| คุณสมบัติชีวมวลต่างๆ | Moisture % | Ash % | Volatile Matter % | Fixed Carbon % | Higher Heating Value kJ/kg | Lower Heating Value kJ/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| แกลบ (Rice Husk) | 12 | 12.65 | 56.46 | 18.88 | 14,755 | 13,517 |
| ฟางข้าว (Rice Straw) | 10 | 10.39 | 60.7 | 18.9 | 13,650 | 12,330 |
| ชานอ้อย (Bagasse) | 50.73 | 1.43 | 41.98 | 5.86 | 9,243 | 7,368 |
| ใบอ้อย (Cane Trash) | 9.2 | 6.1 | 67.8 | 16.9 | 16,794 | 15,479 |
| ไม้ยางพารา (Parawood) | 45 | 1.59 | 45.7 | 7.71 | 10,365 | 8,600 |
| เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber) | 38.5 | 4.42 | 42.68 | 14.39 | 13,127 | 11,400 |
| กะลาปาล์ม (Palm Shell) | 12 | 3.5 | 68.2 | 16.3 | 18,267 | 16,900 |
| ทะลายปาล์ม (Empty Fruit Bunch) | 58.6 | 2.03 | 30.46 | 8.9 | 9,196 | 7,240 |
| ต้นปาล์ม (Palm Trunk) | 48.4 | 1.2 | 38.7 | 11.7 | 9,370 | 7,556 |
| ทางปาล์ม (Palm Leaf) | 78.4 | 0.7 | 16.3 | 4.6 | 3,908 | 1,760 |
| ซังข้าวโพด (Corncob) | 40 | 0.9 | 45.42 | 13.68 | 11,298 | 9,615 |
| ลำต้นข้าวโพด (Corn Stalk) | 41.7 | 3.7 | 46.46 | 8.14 | 11,704 | 9,830 |
| เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome) | 59.4 | 1.5 | 31 | 8.1 | 7,451 | 5,494 |
| เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark) | 60 | 2.44 | 28 | 9.56 | 6,811 | 4,917 |

ตารางที่ 3 ปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิง (ค่าความร้อนสุทธิ) ของพลังงานเชิงพาณิชย์ต่างๆ (ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

| ประเภท (หน่วย) | กิโลแคลอรี/หน่วย | ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ/ล้านหน่วย | เมกะจูล/หน่วย | พันบีทียู/หน่วย | TYPE (UNIT) |
|---|---|---|---|---|---|
| | kcal/UNIT | toe/$10^6$UNIT | MJ/UNIT | $10^3$Btu/UNIT | |
| **พลังงานเชิงพาณิชย์ (COMMERCIAL ENERGY)** | | | | | |
| 1. น้ำมันดิบ (ลิตร) | 8680 | 860 | 36.33 | 34.44 | 1. CRUDE OIL (litre) |
| 2. คอนเดนเสท (ลิตร) | 7900 | 782.72 | 33.07 | 31.35 | 2. CONDENSATE (litre) |
| 3. ก๊าซธรรมชาติ | | | | | 3. NATURAL GAS |
| 3.1 ชื้น (ลูกบาศก์ฟุต) | 248 | 24.57 | 1.04 | 0.98 | 3.1 WET (scf.) |
| 3.2 แห้ง (ลูกบาศก์ฟุต) | 244 | 24.18 | 1.02 | 0.97 | 3.2 DRY (scf.) |
| 4. ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม | | | | | 4. PETROLEUM PRODUCTS |
| 4.1 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ลิตร) | 6360 | 630.14 | 26.62 | 25.24 | 4.1 LPG (litre) |
| 4.2 น้ำมันเบนซิน (ลิตร) | 7520 | 745.07 | 31.48 | 29.84 | 4.2 GASOLINE (litre) |
| 4.3 น้ำมันเครื่องบิน (ลิตร) | 8250 | 817.4 | 34.53 | 32.74 | 4.3 JET FUEL (litre) |
| 4.4 น้ำมันก๊าด (ลิตร) | 8250 | 817.4 | 34.53 | 32.74 | 4.4 KEROSENE (litre) |
| 4.5 น้ำมันดีเซล (ลิตร) | 8700 | 861.98 | 36.42 | 34.52 | 4.5 DIESEL (litre) |
| 4.6 น้ำมันเตา (ลิตร) | 9500 | 941.24 | 39.77 | 37.7 | 4.6 FUEL OIL (litre) |
| 4.7 ยางมะตอย (ลิตร) | 9840 | 974.93 | 41.19 | 39.05 | 4.7 BITUMEN (litre) |
| 4.8 ปิโตรเลียมโค้ก (กก.) | 8400 | 832.26 | 35.16 | 33.33 | 4.8 PETROLEUM COKE (litre) |
| 5. ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง) | 860 | 85.21 | 3.6 | 3.41 | 5. ELECTRICITY (kWh) |
| 6. ไฟฟ้าพลังน้ำ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) | 2236 | 221.54 | 9.36 | 8.87 | 6. HYDROELECTRIC (kWh) |
| 7. พลังงานความร้อนใต้พิภพ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) | 9500 | 941.24 | 39.77 | 37.7 | 7. GEOTHERMAL (kWh) |
| 8. ถ่านหินนำเข้า (กก.) | 6300 | 624.19 | 26.37 | 25 | 8. COAL IMPORT (kg.) |
| 9. ถ่านโค้ก (กก.) | 6600 | 653.92 | 27.63 | 26.19 | 9. COKE (kg.) |
| 10. แอนทราไซต์ (กก.) | 7500 | 743.09 | 31.4 | 29.76 | 10. ANTHRACITE (kg.) |
| 11. อีเทน (กก.) | 11203 | 1110.05 | 46.89 | 44.45 | 11. ETHANE (kg.) |
| 12. โปรเพน (กก.) | 11256 | 1115.34 | 47.11 | 44.67 | 12. PROPANE (kg.) |
| **พลังงานใหม่และหมุนเวียน (NEW & RENEWABLE ENERGY)** | | | | | |
| 1. ฟืน (กก.) | 3820 | 378.48 | 15.99 | 15.16 | 1. FUEL WOOD (kg.) |
| 2. ถ่าน (กก.) | 6900 | 683.64 | 28.88 | 27.38 | 2. CHARCOAL (kg.) |
| 3. แกลบ (กก.) | 3440 | 340.83 | 14.4 | 13.65 | 3. PADDY HUSK (kg.) |
| 4. กากอ้อย (กก.) | 1800 | 178.34 | 7.53 | 7.14 | 4. BAGASSE (kg.) |
| 5. ขยะ (กก.) | 1160 | 114.93 | 4.86 | 4.6 | 5. GARBAGE (kg.) |
| 6. ขี้เลื่อย (กก.) | 2600 | 257.6 | 10.88 | 10.32 | 6. SAW DUST (kg.) |
| 7. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (กก.) | 3030 | 300.21 | 12.68 | 12.02 | 7. AGRICULTURAL WASTE (kg.) |
| 8. ก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตร) | 5000 | 495.39 | 20.93 | 19.84 | 8. BIOGAS ($m^3$) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นอกจากนี้ยังพบปัญหาด้านความไม่แน่นอนของปริมาณชีวมวลที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากชีวมวลส่วนใหญ่ที่นำมาผลิตเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ซึ่งถูกนำไปใช้ในโรงงานของผู้ผลิตชีวมวลหรือโรงงานข้างเคียง เช่น การนำแกลบไปผลิตไอน้ำในโรงสีข้าว การนำกากอ้อยและกากปาล์มไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำในโรงผลิต หรือ เศษไม้ถูกนำไปเผาเพื่อใช้ในการอบยางพารา และการเพาะปลูกชีวมวลเหล่านี้ใช้เวลาในการเพาะปลูกค่อนข้างนาน เช่น การปลูกอ้อย ใช้ระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ปี หรือข้าวที่ใช้เวลาเพาะปลูกประมาณ 3-4 เดือน หรือไม้ยางพาราที่ต้องใช้เวลาปลูกถึง 6-7 ปี จึงเป็นการยากที่จะเพิ่มประมาณการผลิตชีวมวลดังกล่าวให้เพียงพอต่อการนำไปทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในประเทศไทย เนื่องจากต้องใช้พื้นที่เพาะปลูกอีกเป็นจำนวนมาก

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 10 ปี พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน มีเป้าหมายการจัดหาเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลให้ได้ถึง 14 ล้านลิตรต่อวันในปี พ.ศ. 2579 ดังตารางที่ 4 จากความต้องการใช้น้ำมันดีเซลของประเทศไทยที่มีอยู่ 68.5 ล้านลิตรต่อวัน และการใช้น้ำมันปาล์มเพื่อผลิตน้ำมันไบโอดีเซลทำได้เพียง 4.8 ล้านลิตรต่อวันในปัจจุบัน (สถานการณ์การใช้น้ำมันและไฟฟ้า ม.ค.-มี.ค. 2561, สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน) ซึ่งหากมีการจัดหาหรือผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมากยิ่งขึ้น อาจจะส่งผลให้ประเทศไทยขาดความมั่นคงทางด้านอาหาร ซึ่งจะเห็นได้จากวิกฤตน้ำมันปาล์มในปี พ.ศ. 2554 ที่รัฐบาลต้องทยอยลดปริมาณการใช้น้ำมันปาล์มสำหรับการใช้ผลิตไบโอดีเซลเพื่อลดภาระการขาดแคลนน้ำมันปาล์ม และต้องมีการขยายพื้นที่เพื่อทำการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อพื้นที่เพาะปลูกพืชเพื่อเป็นอาหารของมนุษย์ประเภทอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4 ศักยภาพน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซล ปี พ.ศ. 2558-2579
(ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

| ศักภาพน้ำมันปาล์ม | 2558[1] | 2560[1] | 2562[1] | 2569[1] | 2579[2] |
|---|---|---|---|---|---|
| เป้าหมายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน (ล้านไร่) | 4.50 | 5.00 | 5.50 | 7.50 | 10.20 |
| ผลผลิตปาล์มน้ำมัน (ล้านตัน/ปี) | 14.34 | 15.40 | 16.66 | 21.40 | 29.46 |
| ผลผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (ล้านตัน/ปี) | 2.58 | 2.93 | 3.17 | 4.28 | 5.89 |
| น้ำมันปาล์มดิบคงเหลือ (ล้านตัน/ปี)[3] | 1.56 | 1.85 | 2.03 | 2.93 | 4.24 |
| ไบโอดีเซลสูงสุดที่ผลิตได้ (ล้านลิตร/วัน)[4] | 5.60 | 6.50 | 7.10 | 10.00 | 14.00 |

ที่มา : [1]ยุทธศาสตร์ปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม ปี 2558-2569

[2]จากการอนุมานผลผลิตตามพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการปลูกปาล์มทั้งประเทศ

[3]คิดน้ำมันปาล์มดิบคงเหลือโดยยังไม่ได้หักปริมาณการส่งออก

[4]คำนวณโดยคิดการผลิตไบโอดีเซล ชนิด Fatty Acid Methyl Esters (FAME)

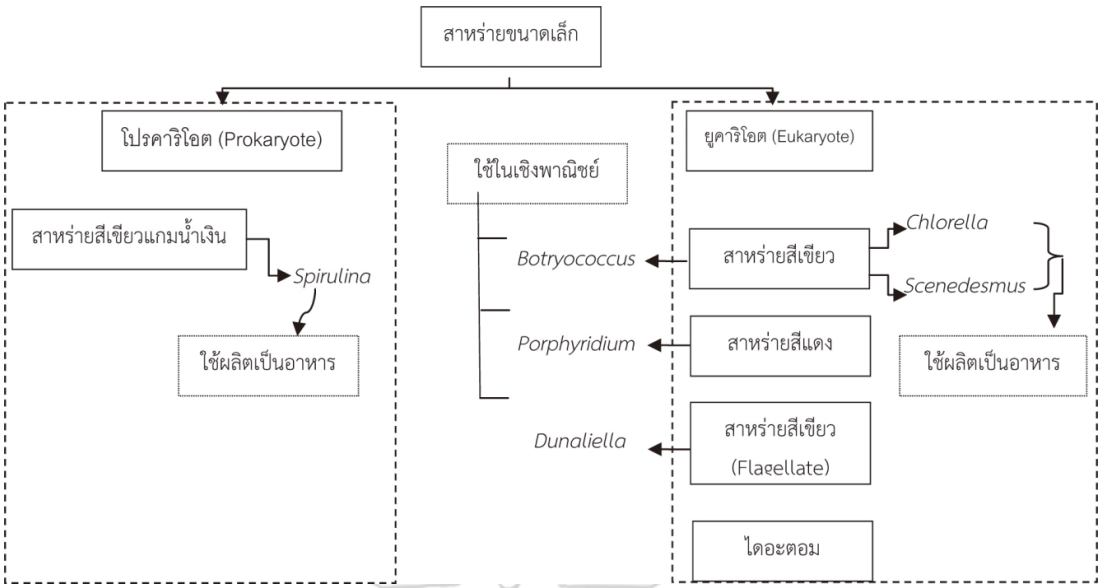
กล่าวโดยสรุป การใช้ชีวมวลประเภทต่างๆ ที่เป็นผลิตเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร หรือพืชพลังงานต่างๆ เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงนั้น ยังมีปัญหาหลักคือด้านปริมาณการผลิตที่ไม่เพียงพอ ต้องใช้พื้นที่เพาะปลูกเป็นจำนวนมากซึ่งกระทบต่อพื้นที่เพาะปลูกอาหารของมนุษย์ และระยะเวลาในการผลิตที่ยาวนาน ทำให้การเพิ่มปริมาณการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมยังทำได้ยาก ซึ่งสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) เป็นพืชพลังงานที่มีความเหมาะสมกว่าชีวมวลอื่นๆ ในการนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอย่างยั่งยืน เนื่องจากสาหร่ายสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย ใช้พื้นที่น้อย รวมไปถึงการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว จึงเป็นชีวมวลแห่งอนาคตที่มีศักยภาพในการพัฒนาต่อไป

## 2.2 สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae)

2.2.1 ความเป็นมาและแนวคิดการใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นเชื้อเพลิง

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นพืชชั้นต่ำเซลล์เดียว บางชนิดไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้การดูผ่านกล้องจุลทรรศน์ สามารถพบเจอได้ในธรรมชาติทั้งในน้ำเค็ม น้ำกร่อยและน้ำจืด มีคลอโรฟิลด์จึงสามารถสร้างอาหารเองได้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง มีขนาดตั้งแต่ระดับ 2-20 ไมโครเมตรจนถึงหลายร้อยไมโครเมตร สาหร่ายขนาดเล็กเป็นพืชที่เติบโตได้รวดเร็วและได้ผลผลิตมาก ซึ่งประสิทธิภาพในการผลิตสาหร่ายขนาดเล็กมากกว่าหญ้าสวิตช์แกรส (Switchgrass) ที่เป็นพืชทางบกที่เติบโตได้เร็วที่สุดถึง 50 เท่า (Demirbaş, 2006) มีหลายสายพันธุ์แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่มโปคาริโอต (Prokaryote) ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และกลุ่มยูคาริโอต (Eukaryote) ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีแดง และไดอะตอม โดยมีการนำไปใช้ผลิตเป็นอาหารและใช้เชิงพาณิชย์ ดังรูปที่ 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 8 สาหร่ายขนาดเล็กและการใช้ประโยชน์
(นุชนาถ แช่มช้อย, 2557)

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นพืชชีวมวลชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตพลังงาน เพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล โดยสาหร่ายประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิดคือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ดังแสดงในตารางที่ 5 จากการที่สาหร่ายมีไขมัน (Lipid) เป็นองค์ประกอบที่ค่อนข้างสูง ภายในเซลล์สาหร่ายบางสายพันธุ์มีการสะสมน้ำมันไว้สูงเกือบร้อยละ 80 ของน้ำหนักแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 6 สาหร่ายขนาดเล็กจึงสามารถนำมาผ่านกระบวนการเพื่อผลิตเป็นน้ำมันดิบ (Crude Oil) หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis Oil) หรือ นำมาสกัดและผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) น้ำมันไบโอเจท (Bio-jet) ได้ (Huang, Xia, Jiang, Li, & Li, 2015; Jazzar et al., 2015; Lokesh, Sethi, Nikolaidis, Goodger, & Nalianda, 2015; H.-Y. Wang, Bluck, & Van Wie, 2014)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายแห้งพันธุ์ต่างๆ

(Dragone, Fernandes, Vicente, & Teixeira, 2010)

| Strain | Protein | Carbohydrates | Lipid |
|---|---|---|---|
| *Anabaena cylindrica* | 43–56 | 25–30 | 4–7 |
| *Botryococcus braunii* | 40 | 2 | 33 |
| *Chlamydomonas rheinhardii* | 48 | 17 | 21 |
| *Chlorella pyrenoidosa* | 57 | 26 | 2 |
| *Chlorella vulgaris* | 41–58 | 12–17 | 10–22 |
| *Dunaliella bioculata* | 49 | 4 | 8 |
| *Dunaliella salina* | 57 | 32 | 6 |
| *Dunaliella tertiolecta* | 29 | 14 | 11 |
| *Euglena gracilis* | 39–61 | 14–18 | 14–20 |
| *Porphyridium cruentum* | 28–39 | 40–57 | 9–14 |
| *Prymnesium parvum* | 28–45 | 25–33 | 22–39 |
| *Scenedesmus dimorphus* | 8–18 | 21–52 | 16–40 |
| *Scenedesmus obliquus* | 50–56 | 10–17 | 12–14 |
| *Scenedesmus quadricauda* | 47 | – | 1.9 |
| *Spirogyra* sp. | 6–20 | 33–64 | 11–21 |
| *Spirulina maxima* | 60–71 | 13–16 | 6–7 |
| *Spirulina platensis* | 42–63 | 8–14 | 4–11 |
| *Synechoccus* sp. | 63 | 15 | 11 |
| *Tetraselmis maculata* | 52 | 15 | 3 |

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำมันที่สะสมในสาหร่ายขนาดเล็กแห้งประเภทต่างๆ

(Chisti, 2007)

Oil content of some microalgae

| Microalga | Oil content (% dry wt) |
|---|---|
| *Botryococcus braunii* | 25–75 |
| *Chlorella* sp. | 28–32 |
| *Crypthecodinium cohnii* | 20 |
| *Cylindrotheca* sp. | 16–37 |
| *Dunaliella primolecta* | 23 |
| *Isochrysis* sp. | 25–33 |
| *Monallanthus salina* | >20 |
| *Nannochloris* sp. | 20–35 |
| *Nannochloropsis* sp. | 31–68 |
| *Neochloris oleoabundans* | 35–54 |
| *Nitzschia* sp. | 45–47 |
| *Phaeodactylum tricornutum* | 20–30 |
| *Schizochytrium* sp. | 50–77 |
| *Tetraselmis sueica* | 15–23 |

สาหร่ายขนาดเล็กเหล่านี้ดำรงชีวิตอยู่ได้ด้วยการสังเคราะห์แสง ซึ่งต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นวัตถุดิบ และจะได้น้ำตาลและก๊าซออกซิเจน ดังนั้น ข้อดีเบื้องต้นของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลคือ การที่สาหร่ายช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก และช่วยเพิ่มออกซิเจนให้กับอากาศหรือแหล่งน้ำต่างๆ ซึ่งมีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง

นอกจากนี้ สาหร่ายขนาดเล็กยังเป็นพืชที่เพาะเลี้ยงได้ง่าย สามารถเติบโตได้ ใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อยและเติบโตได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นๆ โดยปกติสาหร่ายขนาดเล็กจะใช้เวลาการเพาะปลูกจนโตเต็มที่ไม่เกิน 2 สัปดาห์ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2011) และพบว่าการเพาะปลูกสาหร่ายขนาดเล็กในประเทศสหรัฐอเมริกาสามารถใช้พื้นที่เพาะปลูกสาหร่ายเพียง 3% ก็สามารถผลิตน้ำมันเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลได้ถึง 50% ของปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ทั้งหมดในประเทศ (Chisti, 2007) ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งจากข้อดีดังกล่าว ทำให้บริษัทน้ำมันยักษ์ใหญ่หลายราย ได้แก่ Chevron, Exxon, BP หันมาสนใจลงทุนการวิจัยการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย (Mascarelli, 2009)

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบพืชที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในสหรัฐอเมริกา
(Chisti, 2007)

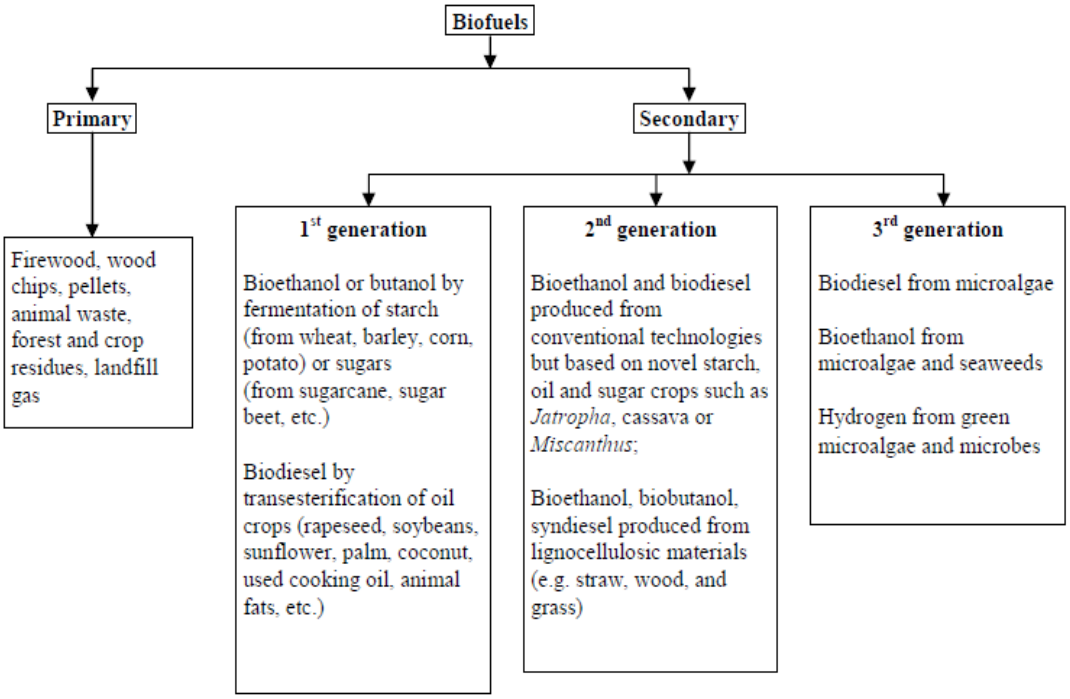
Comparison of some sources of biodiesel

| Crop | Oil yield (L/ha) | Land area needed (M ha)[a] | Percent of existing US cropping area[a] |
|---|---|---|---|
| Corn | 172 | 1540 | 846 |
| Soybean | 446 | 594 | 326 |
| Canola | 1190 | 223 | 122 |
| Jatropha | 1892 | 140 | 77 |
| Coconut | 2689 | 99 | 54 |
| Oil palm | 5950 | 45 | 24 |
| Microalgae[b] | 136,900 | 2 | 1.1 |
| Microalgae[c] | 58,700 | 4.5 | 2.5 |

[a] For meeting 50% of all transport fuel needs of the United States.
[b] 70% oil (by wt) in biomass.
[c] 30% oil (by wt) in biomass.

กล่าวโดยสรุป การเพาะปลูกสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นการสร้างพลังงานทางเลือกที่ยั่งยืนต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย การเพาะเลี้ยงสาหร่ายไม่จำเป็นต้องเพาะเลี้ยงบนพื้นที่เพาะปลูก ใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงน้อยและเป็นการผลิตพืชพลังงานที่ไม่เป็นการแย่งอาหารของมนุษย์และสัตว์ เป็นพลังงานชีวภาพรุ่นที่ 3 ที่มีศักยภาพในการนำมาทดแทนเชื้อเพลิงจาก

ฟอสซิลได้โดยที่ลดปัญหาการแย่งพื้นที่เพาะปลูก และการแย่งพืชอาหารของมนุษย์และสัตว์ที่เกิดขึ้นจากการใช้พืชพลังงานในรุ่นที่ 1 และ 2 ได้ ดังแสดงในรูปที่ 9




รูปที่ 9 การแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงชีวภาพ

(Dragone et al., 2010)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2 ขั้นตอนการเตรียมสาหร่ายเพื่อนำมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

รูปที่ 10 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก

(ที่มา: กลุ่มพัฒนามาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง, 2557)

1) การคัดเลือกพันธุ์สาหร่าย (Strain Selection)

สาหร่ายที่ถูกคัดเลือกเพื่อนำมาผลิตเชื้อเพลิงต้องถูกคัดเลือกพันธุ์ที่ผลิตน้ำมันสูง เพื่อนำไปสู่การเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ ปัจจุบันมีการใช้เทคนิคย้อมสีไนล์ เรด (Nile Red Staining) ในการคัดเลือกพันธุ์สาหร่ายที่มีน้ำมันมาก ซึ่งนอกจากสายพันธุ์แล้ว การผลิตสาหร่ายให้มีน้ำมันมากและเติบโตเร็วขึ้นกับระบบและสภาวะของการเพาะเลี้ยงด้วย (Chisti, 2007)

2) การเพาะเลี้ยงสาหร่าย (Algal cultivation)

สาหร่ายต้องการน้ำ แสงแดด และคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้กระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ในการเจริญเติบโตเหมือนพืชชนิดอื่นๆ สาหร่ายสามารถโตได้ดีในพื้นที่ที่มีอากาศร้อนและมีแสงแดดมาก การเลี้ยงสาหร่ายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การเพาะเลี้ยงในระบบเปิด และระบบปิด

ก. การเพาะเลี้ยงในระบบเปิด (Open-system) เป็นวิธีการเลี้ยงสาหร่ายแบบธรรมชาติ เช่น เลี้ยงในบ่อน้ำ คลอง และชายทะเล เป็นต้น โดยเน้นสถานที่ที่มีแสงแดดและอุณหภูมิสูงกว่า 15 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อดีคือค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและการก่อสร้างค่อนข้างต่ำ แต่การเลี้ยงสาหร่ายโดยวิธีนี้ยากต่อการดูแล ทั้งในเรื่องการปนเปื้อนของบ่อน้ำ เช่นแบคทีเรีย ที่มีผลกระทบต่อการเติบโตของสาหร่าย และ การควบคุมอุณหภูมิและแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ข. การเพาะเลี้ยงในระบบปิด (Closed-system Bioreactor Plants) เป็นการเพาะเลี้ยงที่มีการวิจัยและพัฒนามากเพราะการเพาะเลี้ยงวิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณน้ำ ความเข้มข้นของแสง สภาพความเป็นกรด-ด่าง อีกทั้งยังสามารถพัฒนาและออกแบบให้อยู่ในช่วงที่สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงระบบปิดสามารถตั้งใกล้กับโรงงานที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย อย่างไรก็ดีวิธีการเลี้ยงแบบนี้เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

นอกจากนี้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถแบ่งสภาวะการเพาะเลี้ยงออกเป็น 3 สภาวะ ได้แก่

ก. แบบออโตโทรฟิค (Autotrophic cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ใช้แสงและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากธรรมชาติเป็นหลัก ในการเจริญเติบโตและสังเคราะห์สารชีวมวลต่างๆ หรือคือการใช้อนินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน การ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เลี้ยงแบบนี้ต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก และเลี้ยงใบบ่อตื้น เพื่อให้สาหร่ายได้สัมผัสกับแสงได้อย่างพอเพียง

ข. แบบเฮทเทอโรโทรฟิค (Heterotrophic cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้สารประกอบอินทรีย์ เช่น สารสกัดจากยีสต์ กลูโคส ซูโครส หรือกากน้ำตาล เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน ซึ่งจะเพาะเลี้ยงในที่ที่ไม่มีแสงหรือในที่มืดตลอดเวลา ซึ่งการเลี้ยงแบบนี้จะให้อัตราการเติบโตของสาหร่ายที่ดีขึ้นและให้สาหร่ายที่มีไขมันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมในเชิงพาณิชย์สำหรับการผลิตสาหร่ายที่ใช้ในด้านอาหารและยา

ค. แบบมิกโซโทรฟิค (Mixotrophic cultivation) เป็นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่สามารถผสมแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ซึ่งโดยปกติการเลี้ยงแบบนี้สามารถใช้ทั้งแบบมีแสง หรือไม่มีแสงได้ โดยใช้อินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน การเลี้ยงแบบนี้จะทำให้ได้อัตราการเติบโตที่ดีกว่าทั้งแบบออโตโทรฟิคหรือเฮทเทอโรโทรฟิคด้วยการลดวัฏจักรการเติบโตและการได้ผลผลิตที่มากกว่า

3) การเก็บเกี่ยว (Algal Harvesting)

การเก็บเกี่ยวสาหร่ายท้าได้หลายวิธีโดยใช้เครื่องมือและวิธีการต่าง ๆ ตามแต่ชนิดของสาหร่ายเช่น เครื่องเหวี่ยง การตกตะกอน การกรอง ซึ่งวิธีการปั่นเหวี่ยงไม่เหมาะสำหรับการเพาะเลี้ยงในระดับขยายขนาดเนื่องจากมีต้นทุนในการผมลิตสูง ดังนั้นจึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการเก็บเกี่ยวสาหร่ายให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ เช่น การนำเทคนิคต่างๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เช่น การตกตะกอน (Flocculation) การแยกน้ำออก (Dewatering) และการทำแห้ง (Drying)

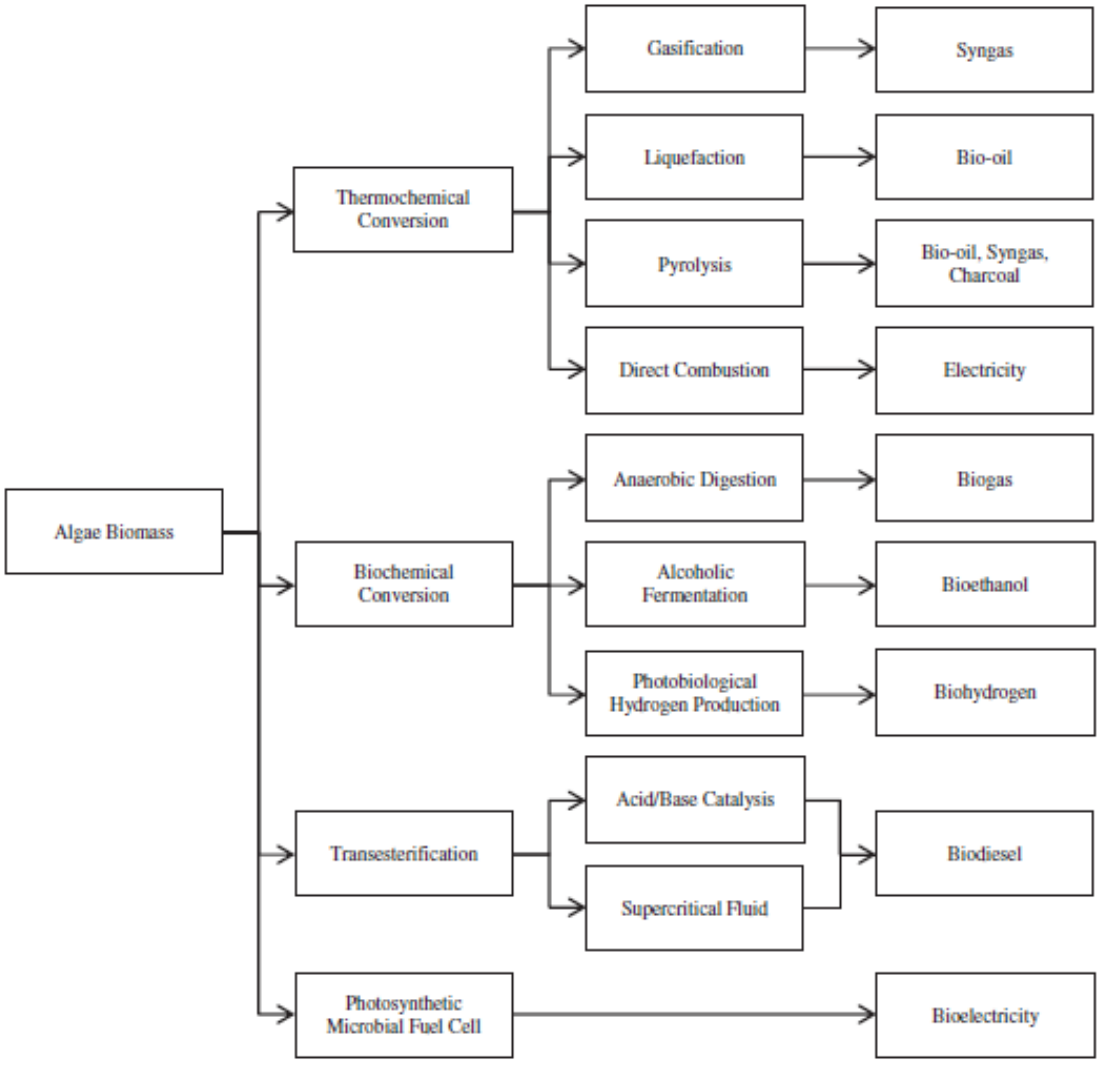
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**2.3 การผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก**

สามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การบีบอัดเพื่อให้คลายน้ำมัน (Expeller/ Press) การใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายน้ำมัน (Hexane Solvent Method) การใช้เอนไซม์ย่อยผนังเซลล์เพื่อให้น้ำมันหลุดออกมา (Enzymatic Extraction) การใช้อัลตราโซนิกกระตุ้นให้เกิดการสั่นจนน้ำมันหลุดออกมา (Ultrasonic-assisted Extraction) และการใช้เทคนิกออสโมซิสโดยอาศัยความต่างของความดัน (Osmotic Shock)

จากการศึกษาในประเทศต่างๆ พบว่ามีการนำสาหร่ายขนาดเล็กมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้หลายวิธี (Dragone et al., 2010) ดังแสดงในรูปที่ 11 แต่กระบวนการแปลงสภาพที่เป็นที่นิยมและศึกษาอย่างแพร่หลาย มี 3 กระบวนการได้แก่ กระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification) เพื่อ

ผลิตไบโอดีเซลดิบ กระบวนการลิควิแฟคชั่น (Liquefaction) เพื่อผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เพื่อผลิตน้ำมันไพโรไลซิส




รูปที่ 11 กระบวนการแปลงชีวมวลสาหร่ายให้เป็นพลังงาน

(Tan, Show, Chang, Ling, & Lan, 2015)

2.3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลดิบจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น

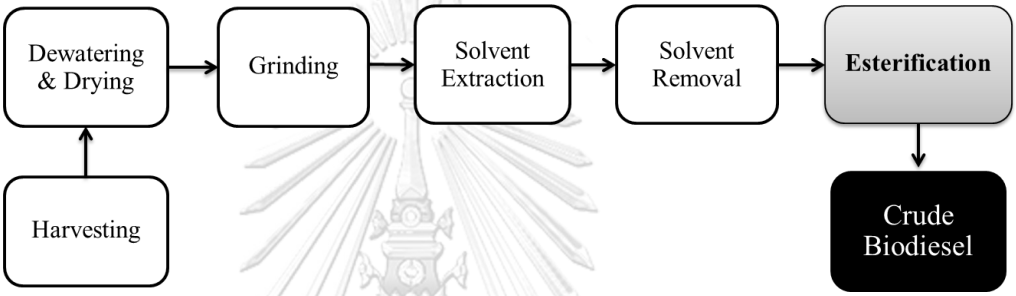
1) กระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification)

กระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น โดยปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ (Ester) เกิดจากกรดคาร์บอกซิลิค (Carboxylic Acid) ที่สกัดทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Alcohol) และมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกรดที่นิยมใช้ได้แก่ กรดซัลฟิวริค ($H_2SO_4$) ตามปฏิกิริยาดังนี้

$$R\text{-}COOH + R\text{-}OH \longrightarrow RCOOR + H_2O$$

2) ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลดิบจากสาหร่ายขนาดเล็ก

หลังจากขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย การผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก มีกระบวนการ 6 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 12




รูปที่ 12 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลดิบจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น

เริ่มจากนำน้ำสาหร่ายมาผ่านกระบวนการเก็บเกี่ยว (Harvesting) และการแยกน้ำออกออกและทำให้แห้ง (Dewatering & Drying) จึงนำมาบดให้ละเอียด (Grinding) เพื่อให้พื้นที่สัมผัสกับสารละลายทำให้สามารสกัดได้ดีขึ้น แล้วนำไปผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้เฮกเซน (Hexane) และนำไปแยกตัวทำละลาย (Solvent Removal) ด้วยการระเหยโดยใช้ความร้อน จึงนำมาผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification) ให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลดิบ (Crude Biodiesel)

3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็กจะใช้การเก็บเกี่ยวด้วยการเหวี่ยงให้ตกตะกอน (Centrifuge) และทำให้แห้งโดยการอบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อให้มีความชื้นน้อยกว่า 1% (Ehimen, Sun, & Carrington, 2010) (Shin, Ryu, Bae, Crofcheck, & Crocker, 2014) หรือต่ำกว่า 15% ซึ่งเทียบเท่ากับการอบแห้งถั่วเหลือง ซึ่งโดยปกติแล้วจะทำให้สามารถสกัดน้ำมันได้ถึง 95% (L. Xu, Brilman, Withag, Brem, & Kersten, 2011)

Ehimen และคณะ ได้ทำการทดลองพบว่าความชื้นของสาหร่ายมีผลต่อกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น และปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้ โดยถ้าหากสาหร่ายมีความชื้นมากกว่า 31.7% จะทำให้ไม่เกิดการเอสเทอริฟิเคชั่น (Ehimen et al., 2010)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็กสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ โดยแบบแรกเป็นการสกัดแบบแห้งแล้วนำมาผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น แบบที่สองเป็นการสกัดโดยใช้กรดเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันปกติ และแบบที่สามเป็นการสกัดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ใช้อุณหภูมิและความดันสูง (L. Chen, Liu, Zhang, Chen, & Wang, 2012) ข้อเสียของการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายแบบแรกคือการใช้พลังงานที่ค่อนข้างเยอะ การนำกลีเซอรอลกลับมาใช้ค่อนข้างยาก ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์ และน้ำเสียต้องได้รับการบำบัด (Meher, Vidya Sagar, & Naik, 2006) โดยการสกัดในแบบที่สามโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว (Saka & Kusdiana, 2001)

เนื่องจากลักษณะของขนาดเซลล์และผนังเซลล์ในสาหร่ายมีความแตกต่างกัน และการนำเพียงแต่ไขมันในสาหร่ายไปผลิตไบโอดีเซล โดยพิจารณาว่าโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในสาหร่ายเป็นของเสีย ทำให้เป็นเรื่องยากและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก (Na et al., 2012)

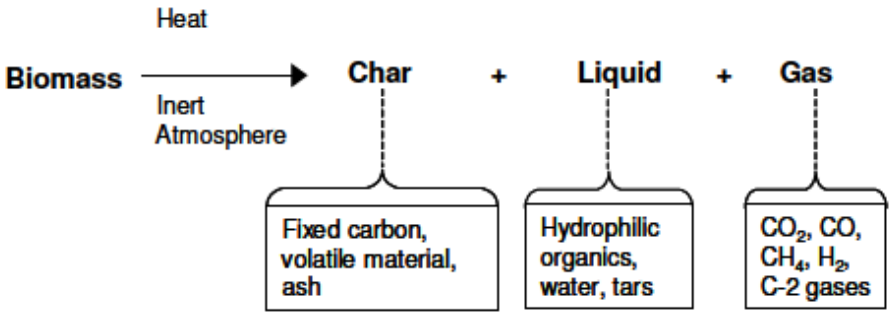
Tercero, Domenicali และคณะ ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อการแข่งกันในเชิงพาณิชย์ แต่พบว่าถ้าหากยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีในปัจจุบันในการผลิต จะยังไม่สามารถนำน้ำมันจากสาหร่ายไปแข่งขันกับน้ำมันจากฟอสซิลได้ โดยต้องเฝ้ารอเทคโนโลยีที่เป็นระดับการค้นพบอันยิ่งใหญ่ (Breakthrough) จึงจะสามารถลดต้นทุนการผลิตให้สามารถแข่งขันได้ (Ramos Tercero, Domenicali, & Bertucco, 2014)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 กระบวนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

1) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้อุณหภูมิที่ 200-600 องศาเซลเซียส โดยสามารถแบ่งได้เป็นไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบกลาง (Intermediate Pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ได้แก่ ถ่านชาร์ (Charcoal) น้ำมันทาร์ (Tar) ไบโอออยล์ (Bio Oil) หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis Oil) และแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas) โดยมีปริมาณแตกต่างกันตามวัตถุดิบ อุณหภูมิและเวลา ดังรูปที่ 13 และตารางที่ 8




รูปที่ 13 แผนภาพกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลและผลที่ได้

(Brownsort, 2009)

ตารางที่ 8 อุณหภูมิ เวลา และผลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่างๆ

(Brownsort, 2009)

| | | Slow Pyrolysis | Intermediate Pyrolysis | Fast Pyrolysis |
|---|---|---|---|---|
| Feed | | Scores of feeds reported | | |
| Temperature, ℃ | Range | 250 - 750 | 320 - 500 | 400 - 750 |
| | Typical | 350 - 400 | 350 - 450 | 450 - 550 |
| Time | Range | mins - days | 1 - 15 mins | ms - s |
| | Typical | 2 - 30 mins | 4 mins | 1 - 5 s |
| Yields, % wt on dry | | | | |
| Char | Range | 2 - 60 | 19 - 73 | 0 - 50 |
| | Typical | 25 - 35 | 30 - 40 | 10 - 25 |
| Liquid | Range | 0 - 60 | 18 - 60 | 10 - 80 |
| | Typical | 20 - 50 | 35 - 45 | 50 - 70 |
| Gas | Range | 0 - 60 | 9 - 32 | 5 - 60 |
| | Typical | 20 - 50 | 20 - 30 | 10 - 30 |

2) ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก

รูปที่ 14 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

เริ่มจากการนำน้ำสาหร่ายมาผ่านกระบวนเก็บเกี่ยว (Harvesting) แล้วนำมากำจัดน้ำ (Dewatering) โดยส่วนใหญ่ใช้กระบวนการตกตะกอน (Flocculation) แล้วปั่นเหวี่ยงให้ตกตะกอน (Centrifuge) แล้วจึงนำมาผ่านการทำให้แห้ง (Drying) ให้มีความชื้นต่ำกว่า 10% แล้วจึงนำไปบดเพื่อให้มีอนุภาคที่เล็กลง (Grinding) ก่อนนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เพื่อผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 14

3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการไพโรไลซิส ถือว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งให้ปริมาณเชื้อเพลิงต่อวัตถุดิบสูง เนื่องจากชีวมวลจะสามารถถูกผลิตเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ถ่านชาร์ และแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ (Mohan, Pittman, & Steele, 2006) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีค่าความร้อนสูง สามารถนำไปจัดเก็บ ขนส่งและใช้งานได้ง่าย (Islam, Islam, & Beg, 2004)

มีการศึกษาการไพโรไลซิสชีวมวลจากพืช (Lignocellulosic biomass) ประเภทต่างๆ ได้แก่ ขี้เลื่อย (Heo et al., 2010) หญ้า Switchgrass (He, Ye, English, & Satrio, 2009) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Shen et al., 2009) ฟางข้าว (Lee, Kang, Park, & Kim, 2005) เมล็ดเซอร์รี่ (R. Xu, Ferrante, Briens, & Berruti, 2009) ฟางข้าวโพด (Yanik, Kornmayer, Saglam, & Yüksel, 2007) อย่างไรก็ดี ปัญหาในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลเหล่านี้ คือ น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ยังมีค่าออกซิเจนสูง มีค่าความหนืดมาก ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของพืช ได้แก่ ลิกนิน เซลลูโลส และต้องผ่านกระบวนการปรับคุณภาพที่ซับซ้อนเพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริง (Czernik & Bridgwater, 2004; Zhang, Chang, Wang, & Xu, 2007)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การไพโรไลซิส Chllorella protothecoides and Microcystis aeruginosa ได้ไบโอออยล์ 18% และ 23% ตามลำดับ และพบว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากสาหร่ายขนาดเล็กมีความเหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่าชีวมวลอื่นๆ ที่ได้จากพืช ซึ่งเมื่อวัดค่าด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph) แล้วพบว่าน้ำมันที่ได้เป็นอัลเคนเส้นตรง (Straight-Chain Alkanes) ซึ่งคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล (Miao, Wu, & Yang, 2004)

หากใช้การควบคุมการเผาผลาญอาหารของ Chllorella protothecoides โดยใช้การเติบโตแบบเฮเทโรทรอฟิค (Heterotrophic Growth) แล้ว จะทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นเป็น 58% และได้ค่าความร้อนถึง 41 MJ/kg สูงกว่าการเลี้ยงแบบแบบออโตโทรฟิค (Autotrophic cultivation) 3.4 เท่า ซึ่งเป็นค่าที่มีความใกล้เคียงเชื้อเพลิงฟอสซิล (Miao & Wu, 2004)

การไพโรไลซิสแบบเร็วกับสาหร่าย Chllorella protothecoides and Microcystis aeruginosa พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีค่าความร้อนที่สูง และมีค่าออกซิเจนต่ำกว่าไบโอออยล์ที่ได้จากชีวมวลพืช (Miao et al., 2004) นอกจากนี้ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในกระบวนการไพโรไลซิส Nannochloropsis Sp. ช่วยทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสที่มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 32 MJ/Kg เมื่อเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสธรรมดาที่ได้ค่าความร้อนเพียง 24.6 MJ/Kg (Pan et al., 2010) หรือการใช้ไมโครเวฟไพโรไลซิสแบบเร็ว (Microwave-assisted Pyrolysis, fMAP) โดยการใช้ SiC เป็นตัวดูดซับร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 จะทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสถึง 59% (Borges et al., 2014)

Duan, Jun et al. ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสร่วมกันระหว่างยางรถยนต์เก่า (Waste Rubber Tire, WRT) ด้วยเอทานอลความร้อนยิ่งยวด (Supercritical Ethanol) อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสถึง 65.4% โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าการผสมสาหร่ายขนาดเล็กเข้าไปในกระบวนการทำให้ช่วยการย่อยสลายยางรถยนต์เก่าให้ดีกว่าเดิม และค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้อยู่ในช่วง 35.80 – 42.03 MJ/Kg

เมื่อศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ ในการไพโรซิสสาหร่ายขนาดเล็กแบบต่างๆแล้ว พบว่าการไพโรไลซิสแบบเร็ว จะทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสมากถึง 75% (Marcilla, Catalá, García-Quesada, Valdés, & Hernández, 2013) ตามข้อมูลในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท และผลที่คาดว่าจะได้จากกระบวนการ
(Marcilla et al., 2013)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

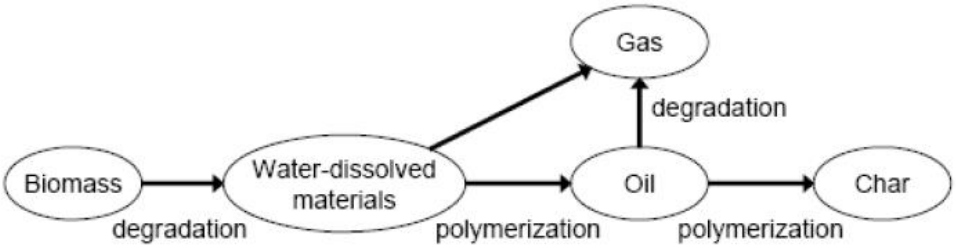
| Mode | Conditions | Liquid (%) | Char(%) | Gas(%) |
|---|---|---|---|---|
| Flash pyrolysis | Moderate temperature(500 1C), short residence time(about 1 s) | 75 | 2 | 13 |
| Fastpyrolysis | Moderate temperature(500 1C), moderateresidencetime(about 10–20 s) | 50 | 20 | 30 |
| Slow pyrolysis | Low temperature(400 1C), very long residence time(more than 30 min) | 30 | 35 | 35 |

2.3.3 การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟคชั่น

1) กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟคชั่น (Hydrothermal Liquefaction หรือ HTL)

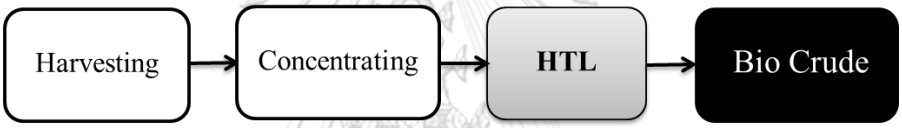
HTL คือการไพโรไลซิสในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 10 เมกกะปาสคาล และอุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส สารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ ของเหลว และของแข็งซึ่งคล้ายกับไพโรไลซิส

เนื่องจาก HTL ทำปฏิกิริยาในน้ำ วัตถุดิบตั้งต้นจึงไม่ต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง จึงเหมาะกับสารชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูง โดยปฏิกิริยาพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 15




รูปที่ 15 ปฏิกิริยาพื้นฐานของ HTL
(ที่มา: คู่มือสารชีวมวลเอเชีย, 2008:104)

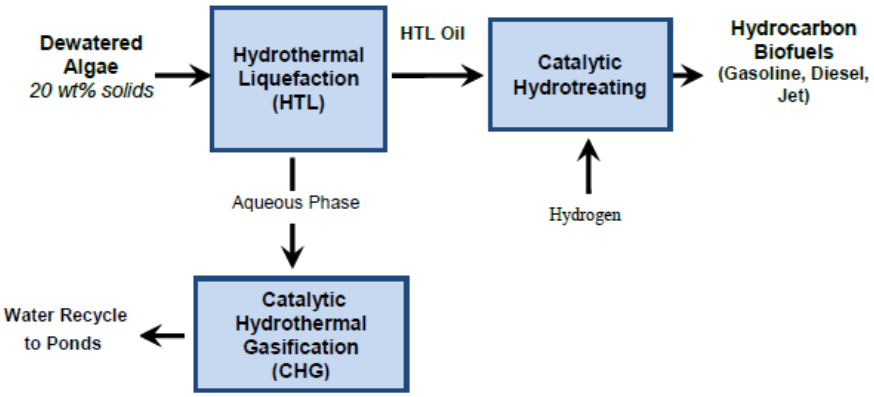
2) ขั้นตอนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก




รูปที่ 16 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการ HTL

เริ่มจากการนำน้ำสาหร่ายมาผ่านการเก็บเกี่ยว ทำให้ได้ความเข้มข้นของสาหร่ายประมาณ 20% เพื่อนำไปผ่านกระบวนการ HTL เพื่อให้ได้น้ำมันดิบชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 17 ไดอะแกรมกระบวนการ HTL สาหร่ายขนาดเล็ก
(Jones et al., 2014)

3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการ HTL เป็นเทคโนโลยีในการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ (Biocrude) จากสาหร่ายที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากลดขั้นตอนการทำให้สาหร่ายแห้ง ซึ่งเป็นต้นทุนที่สำคัญของการผลิตเชื้อเพลิงจากสาหร่ายได้ (Ross et al., 2010; Yu, Zhang, Schideman, Funk, & Wang, 2011) โดยน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้สามารถนำไปผ่านกระบวนการกลั่น เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ (Duan & Savage, 2011)

น้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากกระบวนการ HTL สาหร่ายขนาดเล็กนั้นสามารถผลิตได้ในช่วง 25 %wt. ถึง 82.9 %wt (Biller & Ross, 2011; Wiley, 2015) โดยเป็นการเปลี่ยนทั้งไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำมันคล้ายกับกระบวนการไพโรไลซิส (Biller & Ross, 2011) อย่างไรก็ดีน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้ยังมีส่วนผสมของสารที่ไม่เป็นที่ต้องการ ได้แก่ มีไนโตรเจนและออกซิเจนมากกว่า 2% เกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salt) และโลหะหนัก เช่น แคลเซียม แคดเมียม นิกเกิลและเหล็ก เป็นต้น ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในการกลั่นน้ำมันและการเก็บรักษา (Anastasakis & Ross, 2011) ดังนั้น ต้องนำน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้ไปเพิ่มคุณภาพก่อนนำไปผ่านกระบวนการกลั่นต่อไป

**2.4 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย**

การผลิตน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กผ่านกระบวนการไพไรไลซิสโดยตรง (Direct Pyrolysis) มีข้อดีกว่าการสกัดน้ำมันแล้วนำมาไพโรไลซิสหรือไพโรไลซิสโดยอ้อม (Indirect Pyrolysis) เนื่องจากการไพโรไลซิสโดยตรงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโปรตีนและไขมันในสาหร่ายให้ได้เชื้อเพลิงชีวภาพด้วย ต่างจากวิธีสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายหรือการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เฉพาะส่วนของไขมันในสาหร่ายในการผลิตเชื้อเพลิง (Duan, Jin, Xu, & Wang, 2015) เช่นเดียวกันกับการผลิตน้ำมันผ่านกระบวนการ HTL ที่มีส่วนคล้ายคลึงกับการไพโรไลซิสแต่ใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (Frank, Elgowainy, Han, & Wang, 2013) พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสโดยตรงผลิตน้ำมันได้มากกว่าไพโรไลซิสโดยอ้อม 7% (Vardon, Sharma, Blazina, Rajagopalan, & Strathmann, 2012)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลดิบผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่นหรือการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากกระบวนการ HTL จากสาหร่ายยังต้องนำเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้มาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและคุณค่าเพิ่มเติม (Gerde et al., 2013; Tabernero, Martín del Valle, & Galán, 2012) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม แตกต่างจากกระบวนการไพโรไลซิสโดยน้ำมันที่ผลิตได้นั้นมีมาตรฐานในเชิงอุตสาหกรรมรองรับ (ASTM D7544)

จากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กด้วยวิธีต่างๆ กระบวนการไพโรไลซิสเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ได้ผลผลิตน้ำมันอาจจะสูงถึง 75% (Marcilla et al., 2013) ซึ่งสามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่มีค่าความร้อนสูงถึง 42 MJ/kg (W.-H. Chen, Lin, Huang, & Chang, 2015) ซึ่งใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิล การปรับเปลี่ยนสภาวะเพื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของผลผลิตของแข็ง ของเหลวและแก๊สทำได้ง่าย นอกจากนี้น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ ยังสามารถเก็บได้ง่าย มีค่ากำมะถันต่ำ (Miao et al., 2004) เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ยังคงมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องนำไปผ่านกระบวนการแยกตัวทำละลายออกอีกครั้งด้วยการกลั่นหรือการระเหย (Hossain, Salleh, Boyce, Chowdhury, & Naqiuddin, 2008) จากการศึกษางานวิจัยในปัจจุบันพบว่ากระบวนการไพโรไลซิสมีต้นทุนต่ำและมีโอกาสที่จะทำให้สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์มากที่สุด (Tan et al., 2015) ดังแสดงในตารางที่ 10 และ 11 และผู้วิจัยได้สรุปเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำออกและการทำแห้ง ประสิทธิภาพของกระบวนการ ชนิดของน้ำมันที่ได้ และต้นทุนในการผลิตน้ำมันชีวภาพตามกระบวนต่างๆ ที่ใช้ผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่าย ตามตารางที่ 12

ตารางที่ 10 การศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก
(Tan et al., 2015)

| Method | Conversion efficiency (%) | Biomass moisture content (%) | Operating temperature (°C) | Operating pressure (MPa) | Cost |
|---|---|---|---|---|---|
| Conventional gasification | ~50 | <10 | 800–1000 | 0.14–3.17 | High |
| Hydrothermal gasification | 68–84 | 79–93 | 400–700 | 25–30 | High |
| Hydrothermal liquefaction | 30–45 | ~80 | 280–370 | 10–25 | Medium |
| Pyrolysis | 35–53 | <10 | 350–700 | – | Medium |
| Microwave-induced pyrolysis | 28.6–99.9 | <13.7 | 60–569 | – | Low |
| Direct combustion | 20–40 | <50 | >800 | – | Low |
| Anaerobic digestion | 29–49 | 80–90 | 25–35 | Atmospheric pressure | Low |
| Alcoholic fermentation | 52–89 | <10 | 25–35 | Atmospheric pressure | Low |
| Photobiological hydrogen production | 39–674 ml/L/h | - | 25–35 | Atmospheric pressure | Low–high |

ตารางที่ 11 การใช้กระบวนการต่างๆ ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก (Tan et al., 2015)

| Biomass source | Bioenergy type | Method | Temperature (°C)/ pressure (MPa) | Amount of products | Heating value |
|---|---|---|---|---|---|
| *Chlorella vulgaris* | Biohydrogen | Gasification | 500/36 | 15.1 mol/kg | 35.6 MJ/$m^3$ |
| *Nannochloropsis* sp. | Syngas | Hydrothermal gasification | 500/– | 16.4 mmol/g | 21.1 MJ/$m^3$ |
| *Saccharina latissima* | Biohydrogen | Gasification | 500/36 | 11.0 mol/kg | 27.6 MJ/$m^3$ |
| *Spirulina platensis* | Biohydrogen | Gasification | 500/36 | 11.0 mol/kg | 34.0 MJ/$m^3$ |
| *Phaeodactylum tricornutum* | Methane<br>Biohydrogen | Hydrothermal gasification | 420/32.3 | 1.82 mol/kg<br>3.9 mol/kg | – |
| *Chlorella* sp. | Bio-oil | Hydrothermal liquefaction | 220/– | 17.9 wt% | 37 MJ/kg |
| *Chlorella pyrenoidosa* | Bio-oil | Liquefaction with supercritical acetone | 290/– | 78.9 wt% | – |
| *Nannochloropsis* sp. | Bio-oil | Hydrothermal liquefaction | 260/– | 29.8 wt% | 37 MJ/kg |
| *Nannochloropsis* sp. | Bio-oil | Hydrothermal liquefaction | 350/– | 43 wt% | 39 MJ/kg |
| *Chlorella vulgaris* | Bio-oil | Pyrolysis | 500/– | 12.8 wt% | 24.57 MJ/kg |
| *Botryococcus braunii* | Bio-oil | Pyrolysis | 900/– | – | 39.04 MJ/kg |
| *Hapalasiphon* sp. TISTR 8236 | Bio-oil | Pyrolysis | 900/– | – | 34.24 MJ/kg |
| *Scenedesmus almeriensis* | Syngas | Microwave-induced pyrolysis | 800/– | 93.8 vol% | – |

ตารางที่ 12 สรุปข้อมูลการแยกน้ำออกและการทำแห้ง ประสิทธิภาพกระบวนการ ความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการและต้นทุนของกระบวนการแปลงสภาพต่างๆ ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่าย

| **กระบวนการแปลงสภาพ (Conversion Process)** | **การแยกน้ำออกและทำให้แห้ง (Dewatering and Drying)** | **ประสิทธิภาพกระบวนการ (Conversion Efficiency)** | **ความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการ (Moisture, %)** | **ชนิดของน้ำมันชีวภาพ (Type of Biofuel)** | **ต้นทุน (Cost of Process)** | **รายการอ้างอิง (Reference)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| เอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification) | การตกตะกอน, การหมุนเหวี่ยง, การอบด้วยความร้อน | 65-95% | 10-15% | น้ำมันไบโอดีเซลดิบ (Crude Biodiesel) | สูง | (Ehimen et al., 2010; Lardon, Helias, Sialve, Steyer, & Bernard, 2009; Shin et al., 2014; Torres, Acien, García-Cuadra, & Navia, 2017; L. Xu et al., 2011) |
| ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟคชั่น (HTL) | การทำให้เข้มข้น | 33-58% | 80-90% | น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio crude) | กลาง | (Eboibi, Lewis, Ashman, & Chinnasamy, 2014; Frank et al., 2013; Jones et al., 2014) |
| ไพโรไลซิส (Pyrolysis) | การตกตะกอน ,การกรอง ,การหมุนเหวี่ยง, | 30-75% | 10% | น้ำมันไพโรไลซิส | กลาง | (Brownsort, 2009; Duan et al., 2015; |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | การอบด้วยความร้อน | | | (Pyrolysis oil) | | Marcilla et al., 2013) |

การบวนการไพโรไลซิสแบบมีทั้งแบบเร็วและแบบช้า ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มความร้อนให้กับเตาปฏิกรณ์ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีอัตราการเพิ่มความร้อนที่ 0.1-1°C ต่อวินาที โดยการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิต่ำ (ช่วงประมาณ 300°C) จะได้ถ่านชาร์เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิสูงจะได้แก๊สชีวภาพเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนน้ำมันชีวภาพจะได้มากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 500°C กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นวิธีที่เน้นการได้ผลผลิตที่เป็นน้ำมัน จากการศึกษาของ Marcilla et al. (2013) ซึ่งน้ำมันที่ได้ สามารถเก็บและขนส่งได้ง่าย มีกำมะถันและไนโตรเจนต่ำ ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนด้วยความรวดเร็วทำให้อุณหภูมิไปถึงอุณหภูมิไพโรไลซิสก่อนที่ชีวมวลจะสลายด้วยความร้อนอย่างสมบูรณ์ (Roddy & Manson-Whitton, 2012) กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมีอัตราการให้ความร้อนสูง มีเวลาการทำปฏิกิริยาต่ำ มีอัตราการพาความร้อนสูง และการทำให้แก๊สจากกระบวนการได้รับความเย็นอย่างรวดเร็วให้เกิดการควบแน่นเป็นน้ำมัน (Miao et al., 2004) การศึกษาการไพโรไลซิสของสาหร่ายประเภทต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วของสาหร่ายประเภทต่างๆจากการศึกษาวรรณกรรม

| **ชนิดสาหร่าย** | **เครื่องปฏิกรณ์และสภาวะการทดลอง** | **ข้อสรุป** | **อ้างอิง** |
|---|---|---|---|
| Scenedesmus sp. | เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 440°C อัตราการไหลของไนโตรเจน 33 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 3.8 วินาที | น้ำมันชีวภาพ แก๊สชีวภาพ และถ่านชาร์ได้ 41.54, 21.8, 26.4% ตามลำดับ | (Kim, Koo, & Lee, 2014) |
| C. vulgaris remnants (ผ่านการสกัดด้วยสารละลายเพื่อแยกไขมันออก) | เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 500°C | น้ำมันชีวภาพ แก๊สชีวภาพ และถ่านชาร์ได้ 53, 10, 31% ตามลำดับ | (K. Wang, Brown, Homsy, Martinez, & Sidhu, 2013) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | อัตราการป้อนสาร 100 กรัมต่อชั่วโมง | | |
| Chlorella protothecoides | เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด อัตราการป้อนสาร 4 กรัมต่อนาที อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400–600°C อัตราการไหลของไนโตรเจน 6.6 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 2–3 วินาที | น้ำมันชีวภาพ 57.9% ที่อุณหภูมิ 450°C ด้วยการเลี้ยงแบบ Heterotrophic ซึ่งสูงกว่า Autotrophic 3.4 เท่า น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าออกซิเจนต่ำและค่าความร้อนสูง (41 MJ/kg) | (Miao & Wu, 2004) |
| Chlorella vulgaris | เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด อัตราการป้อนสาร 1.5 กรัมต่อนาที อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400–700°C อัตราการไหลของไนโตรเจน 0.2 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 2 วินาที | การเลี้ยงในสภาวะการขาดไนโตรเจนของสาหร่ายขนาดเล็กทำให้ได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นและมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยการทดลองนี้ได้น้ำมันชีวภาพ 72% ที่อุณหภูมิ 400°C | (Belotti, de Caprariis, De Filippis, Scarsella, & Verdone, 2014) |
| Spirulina platensis | เตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบด อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 450–600°C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 8°C ต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 30 มิลลิลิตรต่อนาที | ได้น้ำมันชีวภาพมากที่สุด 46% ที่อุณหภูมิ 550°C และได้ถ่านชาร์มากสุด 33% ที่อุณหภูมิ 500°C | (Chaiwong, Kiatsiriroat, Vorayos, & Thararax, 2013) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**2.5 มาตรฐานคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิส**

องค์กรของประเทศสหรัฐอมริกา American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้มีการกำหนดคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลโดยแบ่งเป็น 2 เกรด เพื่อแยกชนิดของการนำไปใช้ในเตาเผาและหม้อต้มไอน้ำแบบต่างๆ ดังนี้

1) เกรด G ใช้สำหรับเตาเผาอุตสาหกรรมที่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับน้ำมันไพโรไลซิส โดยคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันไพโรไลซิสเกรด G เป็นไปตามตารางที่ 14 ซึ่งน้ำมันเกรดนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องทำความร้อนบ้านเรือน หม้อต้มไอน้ำขนาดเล็ก เครื่องยนต์หรือเครื่องยนต์เดินสมุทรได้
2) เกรด D ใช้สำหรับเตาเผาเชิงพาณิชย์และเตาเผาอุตสาหกรรมที่มีข้อกำหนดด้านปริมาณของเศษของแข็งและขี้เถ้า และเตาเผาต้องมีอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับน้ำมันไพโรไลซิส โดยคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันไพโรไลซิสเกรด D เป็นไปตามตารางที่ 14 ซึ่งน้ำมันเกรดนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องทำความร้อนบ้านเรือน หม้อต้มไอน้ำขนาดเล็ก เครื่องยนต์หรือเครื่องยนต์เดินสมุทรได้

ตารางที่ 14 ค่าคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสเกรดต่างๆ มาตรฐาน ASTM D7544-12
(ที่มา: http://www.astm.org/Standards/D7544.htm)

| Property | Test Method | Grade G | Grade D |
|---|---|---|---|
| Gross Heat of Combustion, MJ/kg, min | D240 | 15 | 15 |
| Water Content, % mass, max | E203 | 30 | 30 |
| Pyrolysis Solids Content, % mass, max | D7579 | 2.5 | 0.25 |
| Kinematic Viscosity at 40°C, $mm^2/s$, max | D445[A] | 125 | 125 |
| Density at 20°C, $kg/dm^3$ | D4052 | 1.1–1.3 | 1.1–1.3 |
| Sulfur Content, % mass, max | D4294 | 0.05 | 0.05 |
| Ash Content, % mass, max | D482 | 0.25 | 0.15 |
| pH. | E70 | Report | Report |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

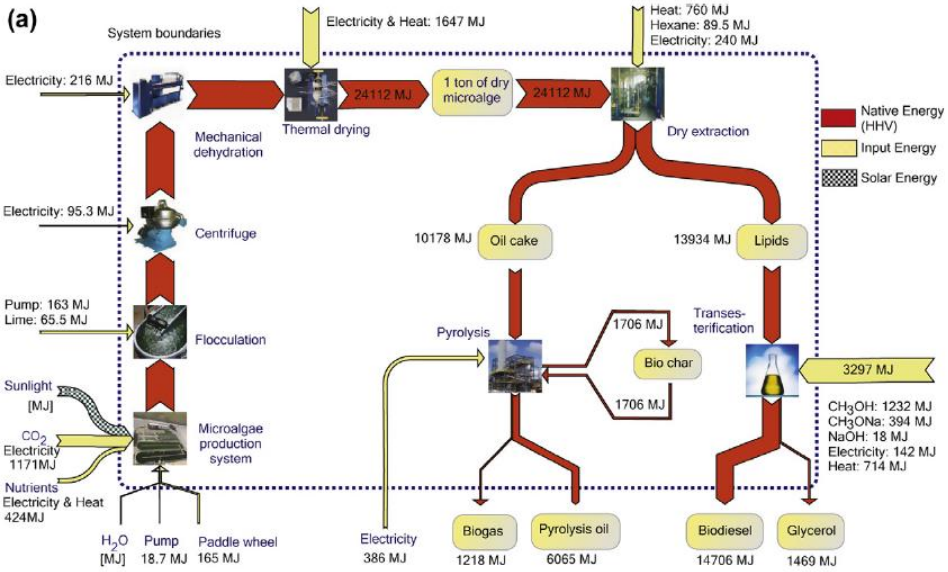
| | | | |
|---|---|---|---|
| Flash Point,°C, min | D93, Procedure B | 45 | 45 |
| Pour Point,°C, max | D97 | –9 | –9 |

**2.6 การศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่าย**

เนื่องด้วยสาหร่ายขนาดเล็กต้องถูกเลี้ยงในน้ำ ซึ่งตัวอย่างในน้ำ 1 ลิตร มีสาหร่ายขนาดเล็กเพียง 0.1-1% โดยน้ำหนัก (Yen et al., 2013) หรือประมาณ 0.5 g/l ในการเลี้ยงในบ่อแบบเปิด (Open Pond) ถึง 5 g/l ในการเลี้ยงในถังหมักแบบให้แสง (Photobioreactor) (Vandamme, Foubert, & Muylaert, 2013) และสาหร่ายมีขนาดที่เล็กมากในระดับไมโครเมตร (2-100 ไมโครเมตร) ดังนั้นในขั้นตอนกระบวนการเก็บเกี่ยว (Harvesting) และการแยกน้ำออก (Dewatering) จึงเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานและต้นทุนในการผลิตสูงที่สุด (Dragone et al., 2010; Lardon et al., 2009; Li, Horsman, Wu, Lan, & Dubois-Calero, 2008; Sanyano, Chetpattananondh, & Chongkhong, 2011) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในการนำไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (Seo, Sung, Oh, & Han, 2015) ทั้งนี้ในปี ค.ศ. 2004 รัฐบาลสหรัฐและรัฐบาลญี่ปุ่นที่เป็นผู้สนับสนุนเชื้อเพลิงจากสาหร่ายซึ่งลงทุนการผลิตไป 25 ล้านเหรียญสหรัฐ และ 117 ล้านเหรียญสหรัฐ ตามลำดับ ยังประกาศว่าการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายเป็นไปไม่ได้ในเชิงการค้า (Huntley & Redalje, 2007) ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง

Xu (2011) ศึกษาแล้วพบว่าต้นทุนที่สูงที่สุดในกระบวนการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายคือขั้นตอนการทำให้แห้ง (Drying) ซึ่งกระบวนการเก็บเกี่ยว (Harvesting) ด้วยวิธีใดๆ ก็ตาม ก็จะต้องมาผ่านกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานมากที่สุด โดยความชื้นที่สามารถลดลงผ่านวิธีการเก็บเกี่ยวได้คือความชื้นที่อยู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular Water, Free Water) ซึ่งสามารถทำความเข้มข้นได้ถึง 30% น้ำหนักแห้ง จากการเริ่มต้นที่ 0.05% น้ำหนักแห้ง ส่วนความชื้นที่เหลือเป็นความชื้นภายในเซลล์ (Intercellular Water) ซึ่งจะทำให้แห้งได้โดยการอบด้วยความร้อนเท่านั้น ยกเว้นกรณีที่เซลล์แตกตัว ซึ่งจากการศึกษายังพบว่าประสิทธิภาพของการทำให้แห้งเชิงกล (Mechanical Dryer) ยังทำให้มีความเข้มข้นได้มากที่สุด คือ 30% และน่าจะไปถึง 50% ในอนาคตอันใกล้ (L. Xu et al., 2011) โดยพบว่าถ้าหาสามารถทำให้แห้งเชิงกลได้มากถึง 50% จะทำให้ลดปริมาณการใช้พลังงานทั้งกระบวนการจนถึงก่อนกระบวนการสกัดน้ำมันถึง 72% โดยแสดงปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนดังรูปที่ 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 18 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย รวมถึงค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (L. Xu et al., 2011)

อย่างไรก็ดี การศึกษาการเก็บเกี่ยวของสาหร่ายพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 70 ไมโครเมตรหรือไมครอน เช่น โคเลสทรัม (Coelastrum) และ สไปรูลิน่า (Spirulina) สามารถจะใช้การตกตะกอนแล้วกรองแบบปกติได้ (Tan et al., 2015) ซึ่งทำให้ต้นทุนการแยกน้ำออกลดลงค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับสาหร่ายขนาดเล็กพันธุ์อื่นๆ ที่ไม่สามารถกรองแยกน้ำได้ นอกจากนี้ผลผลิตน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสสาหร่ายสไปรูลิน่าจากงานวิจัยอื่นๆ ยังได้ปริมาณที่น่าพึงพอใจ จากการศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนในกระบวนการผลิตที่มีความแตกต่างกันเมื่อพิจารณาการวิจัยเพื่อให้ได้ผลในเชิงพาณิชย์แล้ว การคัดเลือกพันธุ์สาหร่ายเพื่อทำการศึกษาการผลิตน้ำมันกำมะถันต่ำจากน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายและน้ำมันเครื่องใช้แล้วในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นสาหร่ายพันธุ์สไปรูลิน่า

## 2.7 สาหร่ายพันธุ์สไปรูลิน่า (Spirulina)

สาหร่ายพันธุ์สไปรูลิน่าเป็นสาหร่ายในกลุ่มสีเขียวแกมน้ำเงิน มีชื่อเรียกอีกอย่างในประเทศไทยว่าสาหร่ายเกลียวทอง สาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่เรียกว่าไซนาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) ในกลุ่มโปคาริโอต (Prokaryote) สาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นสาหร่ายที่มีโปรตีนสูงและมีไขมันต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 15 ดังนั้นสไปรูลิน่าจึงได้รับความนิยมในการนำมาผลิตเป็นอาหารเสริมให้ทั้งมนุษย์และสัตว์ โดยสไปรูลิน่ามี 2 สายพันธุ์คือ *Arthrospira platensis* ที่พบมากในพบในแอฟริกา เอเชียและอเมริกาใต้ ขณะที่ *Arthrospira maxima* จำกัดอยู่แต่เฉพาะในอเมริกากลาง

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบองค์ประกอบชีวเคมีของสาหร่ายประเภทต่างๆ
(Azizi, Keshavarz Moraveji, & Abedini Najafabadi, 2018)

| Microalgae | Protein (wt%) | Carbohydrate (wt %) | Lipid (wt%) |
|---|---|---|---|
| N. *gaditana* | 30.7 | 21.6 | 12.7 |
| B. *braunii* | 30.4 | 15.5 | 17.7 |
| *Chlorella sp.* | 29.6 | 15–16.5 | 9–13 |
| S. *platensis* | 48.36 | 30.21 | 13.3 |
| *Chlorella* | 34.0 | 15.5 | 7.0 |
| C. *reinhardtii* | 47.4 | 15.1 | 18.1 |
| C. *reinhardtii* CW15+ | 45.7 | 11.5 | 22.4 |
| C. *vulgaris* | 54.9 | 9.1 | 15.5 |
| D. *tertiolecta* | 27.2 | 40.5 | 22.0 |
| *Chlorella vulgaris* | 58.1 | 12.4 | 13.5 |
| *Scenedesmus almeriensis* | 44.2 | 25.2 | 24.6 |
| *Nannochloropsis gaditana* | 40.5 | 25.1 | 26.3 |
| *Nannocloropsis oculata* | 39 | 20 | 17 |
| *Dunaliella tertiolecta* | 61.32 | 21.69 | 2.87 |
| C. *vulgaris* | 41.51 | 20.99 | 15.67 |
| C. *vulgaris* remnants | 61.24 | 20.34 | 5.71 |

อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์สไปรูลิน่าอยู่ในช่วง 35-38°C การเจริญเติบโตต้องใช้แสงในกระบวนการสังเคราะห์แสงเท่านั้น ส่วนในช่วงที่ไม่มีแสง สไปรูลิน่าจะทำการสังเคราะห์โปรตีนและสลายโมเลกุล ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการสลายโมเลกุลจะมากกว่า การเลี้ยงสไปรูลิน่าจึงควรพิจารณาสถานที่ที่อากาศในช่วงกลางคืนเย็นกว่า อย่างไรก็ดีถ้าหากอากาศเย็นกว่า 15°C ในช่วงกลางวัน สไปรูลิน่าจะไม่สามารถทนอากาศได้ การเลี้ยงในประเทศไทยในภาคเหนือ จึงเป็นช่วงที่อุณหภูมิและแสงแดดมีความเหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ส่วนใหญ่การเลี้ยงสไปรูลิน่ามักเลี้ยงในบ่อน้ำวนแบบเปิด (Open-channel raceway pond) โดยมีใบพายคนเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของน้ำ การเก็บเกี่ยวทำได้โดยง่าย เนื่องจากมีเซลล์ขนาดใหญ่สามารถกรองได้ และการเก็บเกี่ยว ผู้เก็บเกี่ยวมักเก็บเกี่ยวส่วนหนึ่งและเหลือไว้ส่วนหนึ่งเพื่อเป็นหัวเชื้อในการเจริญเติบโตในรอบต่อไป ผู้ผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่ารายใหญ่ของโลก ได้แก่ ประเทศอเมริกา ไทย อินเดีย ไต้หวัน จีน ปากิสถาน พม่าและชิลี

เมื่อศึกษาองค์ประกอบธาตุของสไปรูลิน่าเทียบกับสาหร่ายพันธุ์อื่นๆ พบว่าสาหร่ายสไปรูลิน่ามีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่ค่อนข้างสูงทำให้มีค่าความร้อนค่อนข้างดี และมีกำมะถัน (Sulfur) และขี้เถ้า (Ash) ต่ำซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของสาหร่ายพันธุ์ต่างๆ (Azizi et al., 2018)

| Microalgae | C (wt%) | H (wt%) | O (wt%) | N (wt%) | S (wt%) | Ash (wt%) | HHV(MJ/kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N. *gaditana* | 30.4 | 6.8 | 26.2 | 5.6 | – | 31.0 | 13.7 |
| B. *braunii* | 32.2 | 6.4 | 27.2 | 5.7 | – | 28.5 | 14.4 |
| Chlorella spp. | 46.1 | 6.1 | 19.1 | 6.7 | 0.4 | 21.6 | 20.4 |
| *Scenedesmus* sp. | 32.1 | 4.8 | 22.1 | 5.3 | 0.5 | 35.2 | – |
| *Chlorella vulgaris* | 47.84 | 6.41 | 25.00 | 9.01 | 1.46 | 9.61 | – |
| *Mougeotia* | 41.51 | 5.59 | 27.03 | 5.40 | 0.51 | 19.96 | 16.63 |
| *Cladophora* | 33.79 | 4.73 | 21.27 | 6.35 | 1.57 | 32.29 | 14.53 |
| S. *platensis* | 46.16 | 7.14 | 35.44 | 10.56 | 0.74 | – | 20.52 |
| *Chlorella* | 50.2 | 7.25 | 33.2 | 9.30 | – | – | 21.2 |
| *C. reinhardtii* | 52.0 | 7.4 | 29.8 | 10.7 | – | – | 23.0 |
| *C. reinhardtii* CW15+ | 50.2 | 7.3 | 31.4 | 11.1 | – | – | 22.0 |
| C. *vulgaris* | 43.9 | 6.2 | 43.3 | 6.7 | – | – | 18.0 |
| *C. vulgaris* | 41.1 | 6.4 | 40.5 | 7.3 | – | 4.7 | 17.72 |
| *D. tertiolecta* | 38.23 | 6.19 | 44.46 | 11.12 | – | – | 11.66 |
| *D. tertiolecta* residue | 44.78 | 6.78 | 40.04 | 8.40 | – | – | 14.83 |
| *Chlorella vulgaris* | 44.8 | 6.8 | 40.4 | 7.0 | 1.0 | – | – |
| *Scenedesmus abmeriensis* | 41.9 | 6.7 | 44.7 | 5.9 | 0.8 | – | – |
| *Nannochloropsis gaditana* | 49.4 | 7.7 | 34.7 | 7.0 | 1.1 | – | – |
| *Nannocloropsis oculata* | 39.9 | 5.5 | 24 | 6.2 | – | 24 | 16.8 |
| *Nannochloropsis* sp. residue | 44.1 | 7.09 | 33.40 | 5.51 | – | 9.9 | 20.7 |
| *Dunaliella tertiolecta* | 39 | 5.37 | 53.02 | 1.99 | 0.62 | – | 14.24 |
| *C. vulgaris* | 42.51 | 6.77 | 27.95 | 6.64 | – | 15.64 | 16.80 |
| *C. vulgaris* remnants | 45.04 | 6.88 | 29.42 | 9.79 | – | 8.34 | 19.44 |
| *Nannochloropsis* | 57.8 | 8.0 | 25.7 | 8.6 | – | – | 17.9 |
| *Porphyridium cruentum* | 51.3 | 7.6 | 33.1 | 8.0 | – | – | 14.7 |
| *Spirulina* | 55.7 | 6.8 | 26.4 | 11.2 | 0.8 | – | 21.2 |

## 2.8 ปัญหาจากน้ำมันไพโรไลซิส

แม้ว่าน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายจะมีแนวโน้มว่าจะเป็นพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีศักยภาพและมีความยั่งยืน เนื่องจากสามารถผลิตได้อย่างไม่จำกัดโดยไม่รบกวนพื้นที่เพาะปลูกและเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมจากการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลผลิตที่มากและรวดเร็ว การผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กยังมีประเด็นปัญหาหลัก 2 ด้าน ได้แก่ คุณภาพและต้นทุนการผลิต

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8.1 ปัญหาด้านคุณภาพน้ำมัน

น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ แม้ว่าจะมีมาตรฐาน ASTM D7544 รองรับว่าสามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาในเตาเผาอุตสาหกรรมได้ แต่มีเงื่อนไขที่สำคัญคือต้องเป็นเตาเผาที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมที่ทำให้เตาเผานั้นใช้น้ำมันไพโรไลซิสได้ (Burner equipped to handle pyrolysis liquid biofuels) ซึ่งน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จากชีวมวลต่างๆ นั้น ไม่สามารถใช้ทนแทนน้ำมันเตากับอุปกรณ์อื่นๆ ทั่วไปได้

ปัญหาหลักด้านคุณภาพที่น้ำมันไพโรไลซิสไม่สามารถใช้ได้ทั่วไปเนื่องจากมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์มาก ได้แก่ กรด แอลกอฮอล์ คีโตน แอลดีไฮด์ ฟีนอล เอสเทอร์ น้ำตาล ฟิวแรนส์ โอลิโกเมอร์ (H. Yang et al., 2014) น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีความหนืดสูง ความชื้นสูง มีปริมาณไนโตรเจน

และออกซิเจนสูง มีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดการกัดกร่อน และมีการให้ความร้อนที่ไม่คงที่ ทำให้น้ำมันไพโรไลซิสมีข้อจำกัดในการใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาได้โดยทั่วไป (Krutof & Hawboldt, 2016; Sharifzadeh et al., 2015; H. Yang et al., 2014).

คุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ภาพรวมของคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันไพโรไลซิสจากการศึกษาวรรณกรรม

| **คุณสมบัติ** | **ค่าที่ได้** | **รายการอ้างอิง** |
|---|---|---|
| Water content (%wt.) | 15-50 | (Garcia-Perez, Adams, Goodrum, Geller, & Das, 2007; Gurevich Messina, Bonelli, & Cukierman, 2015; Nileshkumar, Jani, Patel, & Rathod, 2015) |
| Ash (%wt.) | 0.01-2.7 | (Aysu, Abd Rahman, & Sanna, 2016; Elliott et al., 2012) |
| Oxygen (%wt.) | 12-45 | (Aysu et al., 2016; Duan et al., 2015; Elliott et al., 2012; Gurevich Messina et al., 2015; Nileshkumar et al., 2015) |
| Nitrogen (%wt.) | 0.1-8.0 | (Aysu et al., 2016; Elliott et al., 2012; Gurevich Messina et al., 2015) |
| Sulfur (%wt.) | 0-0.05 | (Elliott et al., 2012; Nileshkumar et al., 2015) |
| Viscosity at 40°C (cSt) | 22-42 | (Elliott et al., 2012) |
| Density at 15°C (kg/dm3) | 1.1-1.3 | (Elliott et al., 2012; Garcia-Perez et al., 2007) |
| High Heating Value (MJ/kg) | 21-38 | (Aysu et al., 2016; Garcia-Perez et al., 2007; Gurevich Messina et al., 2015; X. Wang, Zhao, & Yang, 2016) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | |
|---|---|---|
| pH | 2-4 | (Garcia-Perez et al., 2007; Gurevich Messina et al., 2015; Nileshkumar et al., 2015) |

มีการงานวิจัยศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสค่อนข้างมาก เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้น้ำมันไพโรไลซิสสามารถนำไปใช้ทดแทนดีเซลหรือน้ำมันเตาได้ โดยวิธีปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิสแบ่งเป็นกระบวนการได้ดังนี้

1) กระบวนการทางกายภาพ (Physical Method)

ก. การผสม (Emulsion, Blending)

เนื่องจากน้ำมันไพโรไลซิสมีสารที่มีขั้วค่อนข้างมาก ได้แก่ ฟีนอล กรดคาร์บอกซิลิค และคาร์บอกซิลิคอะโรแมติกส์ ทำให้ไม่สามารถผสมได้โดยตรงกับน้ำมันดีเซล (Capunitan & Capareda, 2013) ซึ่งการผสมอาจจะทำได้โดยการเพิ่มสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่เหมาะสม อย่างไรก็ดีปัญหาคือ สารลดแรงตึงผิวมีราคาค่อนข้างสูง

ข. การกรอง (Filtration)

น้ำมันไพโรไลซิสผสมไปด้วยโลหะแอลคาไล อนุภาคของแข็ง หรือถ่านชาร์ ซึ่งลดเสถียรภาพในการเก็บน้ำมันและสร้างปัญหาให้กับการใช้งาน โดยการกรองด้วย glass wool หรือ granular filter สามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันที่ได้ รวมถึงการลดความหนืด ความเป็นกรด ปริมาณของแข็งและขี้เถ้าได้ อย่างไรก็ดี ความชื้นของน้ำมันหลังจากผ่านกระบวนการกรองอาจจะเพิ่มขึ้น

ค. การใส่สารละลาย (Solvent Addition)

การใส่ตัวทำละลายอินทรีย์ในน้ำมันไพโรไลซิสช่วยลดค่าความหนืดและเพิ่มเสถียรภาพให้กับน้ำมัน โดยนักวิจัยส่วนใหญ่ใช้เอทานอลหรือเมทานอล ซึ่งพบว่าเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อพิจารณาด้านราคา (Pidtasang, Udomsap, Sukkasi, Chollacoop, & Pattiya, 2013)

ง. การกลั่น (Distillation)

กระบวนการเหมือนการกลั่นปิโตรเลียม โดยใช้พื้นฐานจุดเดือดของน้ำมันแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน แต่เป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) กระบวนการทางเคมี (Chemical Method)

ก. การเติมไฮโดรเจนโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrogenation)

เนื่องจากน้ำมันไพโรไลซิสมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าความร้อน ความหนืด ความเป็นขั้ว ดังนั้นวิธีที่สามารถลดค่าออกซิเจนในน้ำมันไพโรไลซิสสามารถทำได้โดยการเติมไฮโดรเจนโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันสูง โดยการใช้ไฮโดรเจนจับกับออกซิเจนได้น้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้น้ำมันที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น แต่ปัญหาของวิธีการนี้คือราคาของตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนมีราคาสูงมาก (Zhang et al., 2007)

ข. การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของไหล (Fluidized catalyzed cracking, FCC)

เป็นกระบวนการที่ทำได้โดยการแตกสลายโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์ โดยนิยมใช้ซีโอไลท์ (Zeolite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ค. การเอสเทอริฟิเคชั่นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Esterification)

เป็นกระบวนการที่ใช้แอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิคในน้ำมันไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ได้เอสเทอร์ออกมาจากกระบวนการ โดยกระบวนการนี้สามารถลดปริมาณกรดในน้ำมันไพโรไลซิสและสร้างเสถียรภาพให้กับน้ำมัน

ง. ปฏิกิริยาปฏิรูปด้วยไอน้ำ (Steam Reforming)

เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยไอน้ำด้วยสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายตัวอย่างสมบูรณ์และจับตัวเป็นโครงสร้างใหม่ ลดคาร์บอน และออกซิเจนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนนอคไซด์ (Remiro, Valle, Aguayo, Bilbao, & Gayubo, 2013)

จ. การไพโรไลซิสร่วม (Co-pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสร่วมอาจทำให้คุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ดีขึ้นถ้าหากสามารถคัดเลือกวัตถุดิบและส่วนผสมที่ได้ผลดี ซึ่งในบางครั้งอาจจะผสมกันระหว่างชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล จากการทดลองของ Zhang H Y et al. (2012) พบว่าการไพโรไลซิสร่วมกันระหว่างไม้สนและแอลกอฮอล์ทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสไม้สนเพียงอย่างเดียว

จากการพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนการผลิตเพื่อการแข่งขันในเชิงพาณิชย์แล้ว การแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสต้องใช้การพัฒนาให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น ด้วยต้นทุนการปรับปรุงคุณภาพที่มีราคาไม่สูง ซึ่งจากวิธีที่ได้ศึกษาดังกล่าว การผสมน้ำมัน (Blending) จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการพัฒนา

2.8.2 ปัญหาต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก

ต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กยังเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์ จากการศึกษาวรรณกรรม พบว่ามีงานวิจัยไม่มากที่ได้ศึกษาถึงต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งผู้วิจัยสามารถสรุปเป็นข้อมูลมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก

| **ข้อมูลการศึกษา** | **รายการอ้างอิง** |
|---|---|
| การศึกษาการผลิตน้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็ก ปัญหาต้นทุนที่สูงเกิดจากการที่ต้องแยกน้ำออก (Dewatering) ซึ่งทำให้สาหร่ายให้แห้งทำได้หลายวิธี ได้แก่ การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) และนำมาผ่านการอบแห้งเย็น (Freeze Dry) หรือการอบแห้งแบบถาด (Tray Dry) อย่างไรก็ดี การผลิตด้วยวิธีดังกล่าวยังมีต้นทุนที่สูงและไม่เหมาะในการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจากข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ด้วยวิธีดังกล่าวโดยทั่วไปจะมีค่าใช้จ่ายในการทำสาหร่ายให้แห้งที่ 12-15 บาท/กิโลกรัม | (Becker, 1994) |
| ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยว (Harvesting) เป็นต้นทุนในการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย 20-30% และเมื่อรวมกับค่าใช้จ่ายในการสกัดน้ำมัน จะเป็นต้นทุนมากกว่า 50% ของต้นทุนทั้งหมดของน้ำมัน | (Molina Grima et al. 2003), (Moheimani 2005). |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| พลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการแยกน้ำออก (Dewatering) ใช้ 84.9% ของพลังงานที่ต้องใช้ในการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย | (Lardon et al., 2009) |
| ต้นทุนการผลิตมวลสาหร่ายอยู่ที่ประมาณ 200 บาทต่อกิโลกรัมน้ำหนักสาหร่ายแห้ง โดยมีปริมาณน้ำมันที่ 20-30% ของสาหร่ายแห้ง | (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), 2013) |
| เครือข่ายวิจัยพลังงานจากสาหร่ายขนาดเล็กแห่งประเทศไทย (คพท.) หรือ THINK ALGAE ซึ่งเป็นความร่วมมือของเอกชนและมหาวิทยาลัยต่างๆ มีเป้าหมายในเชิงพาณิชย์ที่จะลดต้นทุนของน้ำมันจากสาหร่ายให้ได้ต่ำกว่า 150 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล | (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), 2013) |
| ต้นทุนจากการเลี้ยงสาหร่ายในอ่างน้ำวน (Raceway Pond) กับในถังหมักแบบให้แสง (Photobioreactor) เท่ากับ 64 บาท/ลิตร และ 128 บาท/ลิตร | (Sawaengsak, Silalertruksa, Bangviwat, & Gheewala, 2014) |
| การอบแห้งด้วยความร้อนก่อนไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal Drying prior to Catalytic Pyrolysis, TDCP) เทียบกับการทำให้แห้งทางกลก่อนไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Mechanical Dewatering prior to Catalytic Pyrolysis (MDCP) ได้ราคาน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กต่ำที่สุดที่ควรจำหน่ายเท่ากับ 1.8 เหรียญต่อลิตร และ 1.49 ลิตรตามลำดับ (เป็นการศึกษาจากการประมาณการต้นทุนจากการประกอบธุรกิจทั้งหมด) | (Thilakaratne, Wright, & Brown, 2014) |
| มีการศึกษาต้นทุนของชีวมวลสาหร่ายอยู่ในช่วง 0.35 เหรียญต่อกิโลกรัม ถึง 7.32 เหรียญต่อกิโลกรัม และน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายอยู่ที่ 0.17 เหรียญต่อลิตร จนถึง 2.46 เหรียญต่อลิตร | (Thilakaratne et al., 2014) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| ต้นทุนจากการประมาณการธุรกิจทั้งหมดของการผลิตน้ำมันดีเซลจากกระบวนการ Hydrotreating น้ำมันไพโรไลซิสสาหร่าย *Chlamydomonas reinhardtii* เท่ากับ 3.64 เหรียญสหรัฐต่อลิตร ซึ่งส่วนที่แพงที่สุดเกิดจากต้นทุนของสารอาหาร (Nutrients) และเงินลงทุนในบ่อน้ำวนในกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย | (Hognon, Delrue, & Boissonnet, 2015) |

2.8.3 บทสรุปการพัฒนานวัตกรรมจากน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็ก

จากการศึกษาข้อมูลต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก พบว่าปัญหาต้นทุนการผลิตส่วนที่สำคัญคือ ต้นทุนในช่วงการเพาะเลี้ยง (Cultivation) ที่เกิดจากสารอาหาร (Nutrients) และต้นทุนในช่วงการเก็บเกี่ยว (Harvesting) และต้นทุนในการแยกน้ำออก (Dewatering) และการทำให้แห้ง (Drying) ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่มีความเหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายเนื่องจากได้ผลผลิตที่ดีและมีต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำแล้ว ส่วนการศึกษาปัญหาด้านคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กที่ยังมีประเด็นปัญหาด้านคุณภาพในบางคุณสมบัติทำให้ไม่สามารถนำไปใช้โดยตรงกับอุปกรณ์โดยทั่วไปได้

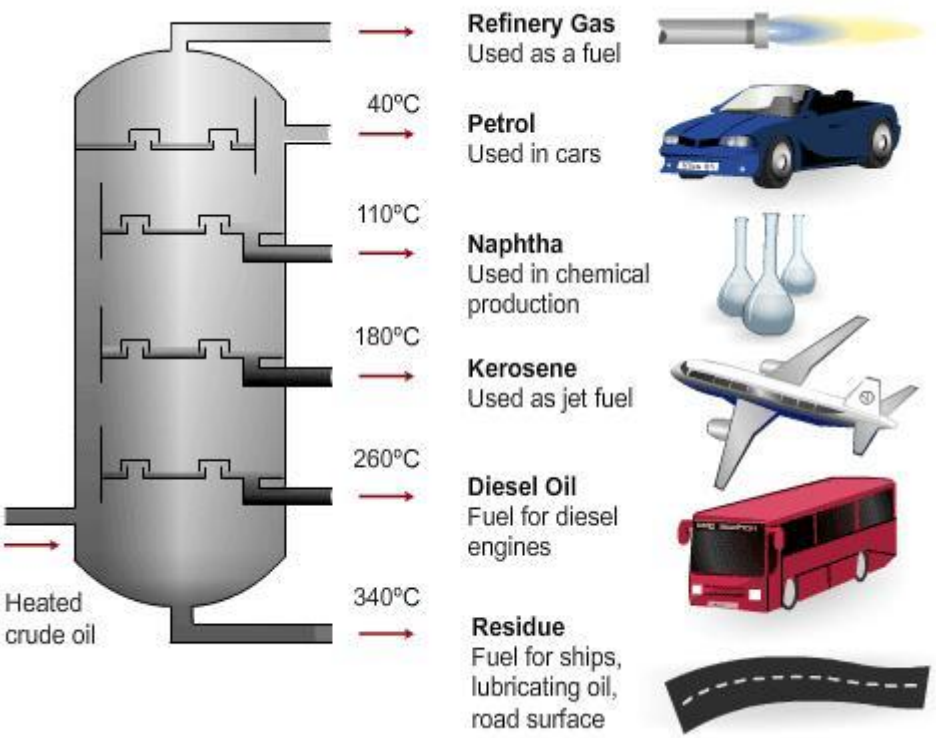
แนวคิดในการพัฒนานวัตกรรมจากปัญหาดังกล่าว เพื่อสร้างให้เกิดความสามารถในการแข่งขันเชิงพาณิชย์ คือ การนำน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กมาพัฒนาให้เป็นน้ำมันที่มีคุณภาพและราคาที่สูงขึ้น (High quality, high value product) ด้วยกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งพบว่า การพัฒนาน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อใช้ผลิตเป็นน้ำมันเตากำมะถันต่ำ (Low sulfur fuel oil, LSFO) ตามความต้องการขององค์การทางทะเลระหว่างประเทศ ผ่านกระบวนการผสม (Blending) กับน้ำมันอื่นที่มีต้นทุนต่ำและมีคุณภาพที่เหมาะสมและเข้ากันได้ สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กที่เป็นน้ำมันที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน (Sustainable green fuel) ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.9 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Used Lubricating Oil)

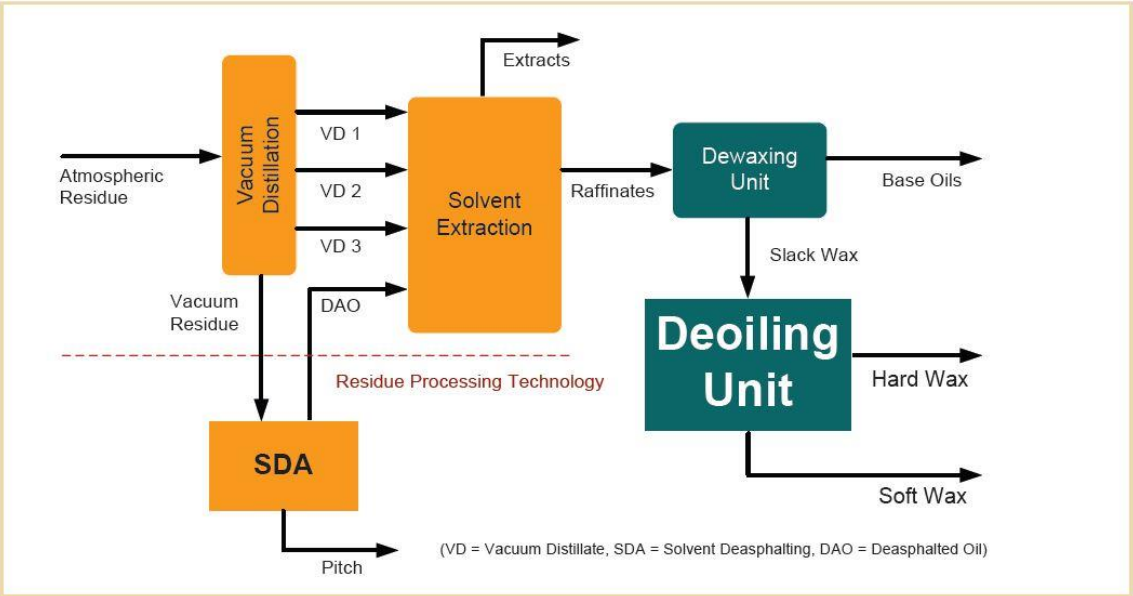
2.9.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil)

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil) เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (รูปที่ 19) ซึ่งจากหอกลั่นบรรยากาศ ต้องนำกากส่วนที่เหลือจากการกลั่นภายใต้หอกลั่นบรรยากาศ (Long Residue) ไปผ่านกระบวนการกลั่นอีกรอบภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) ที่มีเกรดต่างๆ ตามความหนืดต่อไป (รูปที่ 20) โดยน้ำมันหล่อลื่นประกอบไปด้วย 80-90% น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และ 10-20% เป็นสารปรุงแต่ง (Additives) และสารประกอบอื่นๆ (Rincón, Cañizares, García, & Gracia, 2003)




รูปที่ 19 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ

(ที่มา:http://www.bbc.co.uk/bitesize/standard/chemistry/materialsfromoil/fractional_distillation/revision/3/)




รูปที่ 20 การนำ Long Residue ไปผ่านกระบวนการกลั่นสุญญากาศเพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (ที่มา: http://www.edl.poerner.de/en/areas-edl/edl-dewaxing-deoiling/)

2.9.2 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Used Lubricating Oil)

น้ำมันหล่อลื่นเมื่อผ่านการใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นจะเสื่อมสภาพ ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีไม่เหมาะสมกับการใช้ต่อไป (Tsai, 2011) โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (Used Lubricating Oil, ULO) ถูกจัดให้เป็นขยะอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อทั้งสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ และถูกจัดอยู่ใน F List ของการจัดกลุ่มขยะอันตราย เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะประกอบไปด้วยสิ่งปนเปื้อนที่เป็นอันตราย ได้แก่ โลหะหนัก โพลีคลอริเนตไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls, PCBs) และ โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งหากสารอันตรายเหล่านี้อยู่ในแหล่งน้ำจะทำให้แสงแดดและออกซิเจนไม่สามารถผ่านไปสู่แหล่งน้ำได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ (Kanokkantapong, Kiatkittipong, Panyapinyopol, Wongsuchoto, & Pavasant, 2009)

อย่างไรก็ดีน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสามารถที่จะนำกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานใหม่หรือนำมารีไซเคิลผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงกว่าการนำไปทิ้งหรือกำจัด เนื่องจากค่าความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วยังมีค่าค่อนข้างสูง (40 MJ/kg) (Uçar, Karagöz, Yanik, Saglam, & Yuksel, 2005) จากรายงานของ Groupement Européen de l'Industrie de la Régénération (GEIR) ในปี ค.ศ. 2015 พบว่าในกลุ่มประเทศ EU มีการใช้น้ำมันหล่อลื่นประมาณ 5.7 ล้านตันต่อปี ซึ่ง 2.7 ล้านตันสามารถเก็บมารีไซเคิลได้โดยผ่านกระบวนการที่เหมาะสม ซึ่งโดยปกติมักจะใช้กลับมาเป็นแหล่ง

พลังงาน แต่การใช้เป็นแหล่งพลังงานโดยตรงมักมีปัญหาเรื่องฝุ่นละอองและขี้เถ้า (Kanokkantapong et al., 2009) ทำให้รัฐบาลของหลายๆประเทศเน้นการนำกลับมารีไซเคิลเป็นน้ำมันหล่อลื่นอีกครั้ง (มากกว่า 80% ในปี ค.ศ. 2015)

กระบวนการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการนำไปใช้ได้ 2 วิธี

1) การนำกลับมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

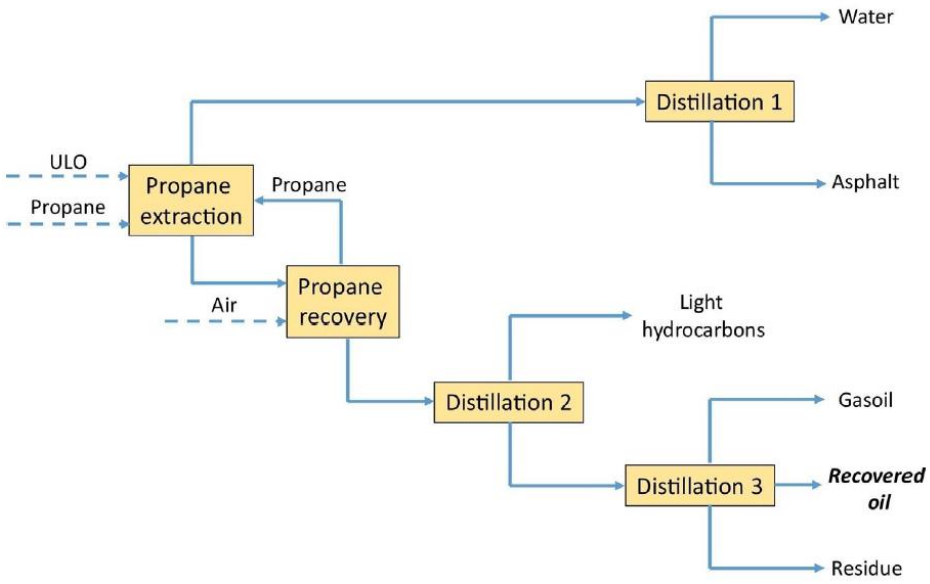
สามารถเรียกอีกวิธีกว่าการกลั่นซ้ำใหม่ (Re-refining) เพื่อผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) ในการนำไปผลิตน้ำมันหล่อลื่นต่อไป โดยเทคนิคที่ทำการใช้ในการกลั่นซ้ำใหม่ที่เป็นที่นิยมมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี วิธีทางกายภาพ และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Hsu & Liu, 2011; Kheireddine, El-Halwagi, & Elbashir, 2013)

วิธีทางเคมีที่เป็นทีนิยมใช้ค่อนข้างมาก คือ กระบวนการแอซิดเคลย์ (Acid-clay) เป็นกระบวนการที่สามารถผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ประหยัด อย่างไรก็ดีวิธีนี้เป็นวิธีที่สร้างตะกอนกรด (Acid sludge) ซึ่งเป็นสารพิษที่ต้องมีค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัด (Hamad, Al-Zubaidy, & Fayed, 2005; Kheireddine et al., 2013) ซึ่งในปัจจุบันถูกห้ามใช้ในประเทศที่พัฒนาแล้ว

วิธีทางกายภาพ ได้แก่ กระบวนการกลั่นแยกตามปกติทั้งแบบกลั่นบรรยากาศและกลั่นสุญญากาศ ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกว่าการใช้สารเคมี แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องถูกนำไปปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้ (Rincón et al., 2003)

วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย สามารถใช้โพรเพนเป็นตัวสกัดน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วได้ และนำไปผ่านกระบวนการกลั่นต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 21 กระบวนการรีไซเคิลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายโพรเพนและนำไปกลั่น

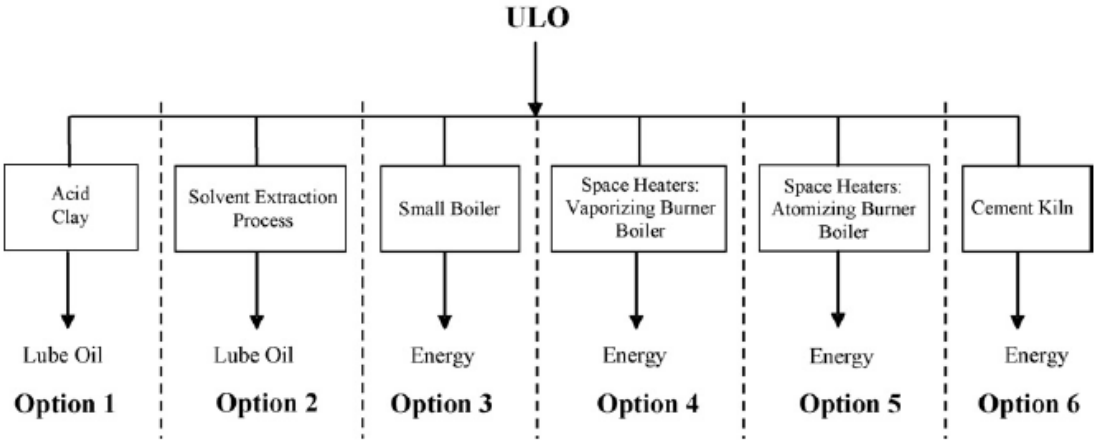
(Botas, Moreno, Espada, Serrano, & Dufour, 2017)

2) การนำไปใช้เป็นพลังงาน

เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ง่ายและประหยัดในการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วไปใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล สามารถนำไปใช้ในหม้อต้มไอน้ำ หรือเตาซีเมนต์ อย่างไรก็ดี ปัญหาในการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วคือ ตะกรัน (Fouling) ฝุ่นละออง (Particulate Matter) และขี้เถ้า (Ash) ที่เพิ่มมากขึ้นจากการเผาไหม้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิธีการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ มีรายละเอียดเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 22

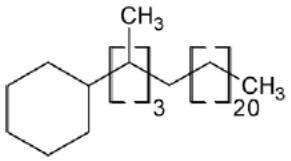
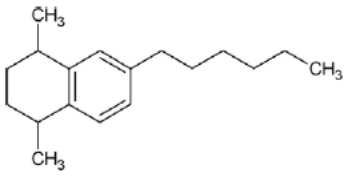
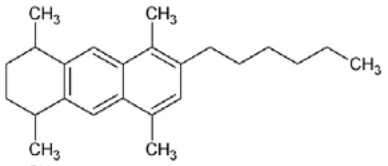
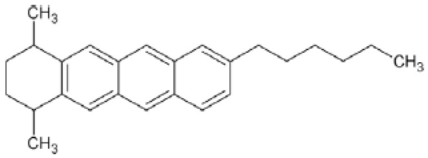



รูปที่ 22 วิธีต่างๆ ในการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
(Kanokkantapong et al., 2009)

2.9.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

หลังจากน้ำมันหล่อลื่นผ่านกระบวนการใช้เพื่อหล่อลื่นในระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์แล้ว น้ำมันยังประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มาจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (saturated, monoaromatics, diaromatics and polyaromatics) แต่จะเกิดโฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบาจากการเสื่อมสภาพของน้ำมัน น้ำ และสารประกอบต่างๆ ได้แก่ แอลกอฮอล์ สารประกอบไนโตรจิเนท และสารประกอบฮาโลจิเนท (Nitrognated and Halogenated Compound) ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของสารปรุงแต่ง (Additives) องค์ประกอบและโครงสร้างของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแสดงในรูปที่ 23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

| Compound | | Composition (wt %) |
|---|---|---|
| Saturated |  | 60.5 |
| Monoaromatic |  | 16.6 |
| Diaromatic |  | 2.5 |
| Polyaromatic |  | 0.4 |
| Water | | 3.0 |
| n-hexane | | 3.0 |
| Trinitrobenzene | | 14.0 |

รูปที่ 23 องค์ประกอบและโครงสร้างของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

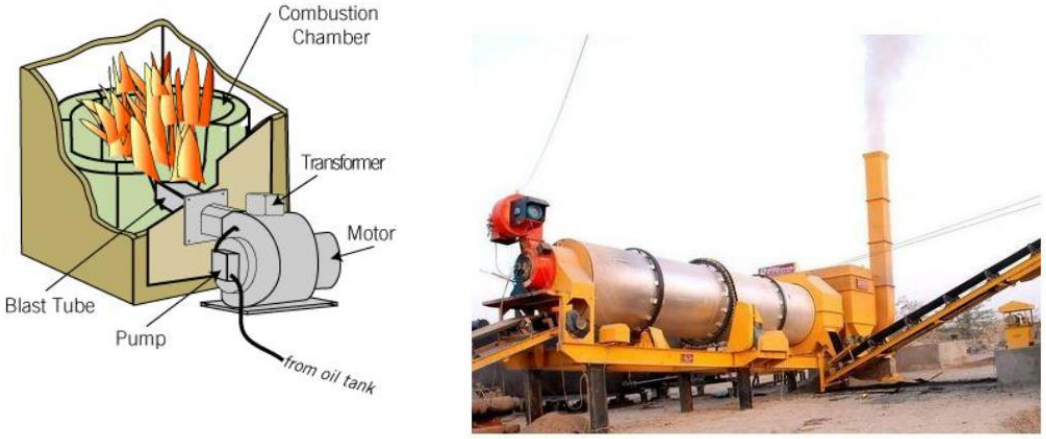
(Botas et al., 2017)

2.9.4 การใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงในประเทศไทย

การนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนทำได้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่ใช้กับกระบวนการเผาตรง (Direct Burn) แสดงในรูป 24 ได้แก่ ธุรกิจผลิตเหล็ก แก้ว กระดาษ หรือการผลิตยางมะตอยผสมร้อน (Hot mixed asphalt) เนื่องจากยังมีปัญหาการเกิดตะกรันและขี้เถ้าระบบ ที่ต้องมีการทำความสะอาดเป็นระยะ

น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนจะนำไปสู่การจำหน่ายผลิตภัณฑ์ทดแทนน้ำมันเตา ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อขจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ได้แก่ เศษโลหะ และน้ำ โดยโรงงานปรับปรุงคุณภาพจะซื้อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากศูนย์บริการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องต่างๆ ในประเทศ และนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การตกตะกอน (Flocculation) การกรอง (Filtration) การให้ความร้อนไล่ความชื้น (Heating) การดักจับโลหะ (Magnetic Detection) การเติมสารละลาย (Solvent Addition) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ดีขึ้นให้กับน้ำมัน ซึ่งกระบวนการต่างๆทั้งหมดนั้น ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละที่จะเลือกใช้ ซึ่งคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ซื้อเข้ามา ลักษณะการนำไปใช้ การบริการทำความ

สะอาดอุปกรณ์ให้กับลูกค้า และราคาต้นทุนการปรับปรุงคุณภาพในขั้นตอนต่างๆ โดยตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจากโรงงานในประเทศไทยเพื่อจำหน่ายทดแทนน้ำมันเตา แสดงในตารางที่ 19




รูปที่ 24 ระบบเผาตรง (Direct Burn)
(ที่มา: ส่วนบริการเทคนิคตลาดพาณิชย์ บมจ.ปตท.)

ตารางที่ 19 ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่จำหน่ายในประเทศไทย

| **คุณสมบัติ** | **วิธีการทดสอบ** | **หน่วย** | **ผลที่ได้** |
|---|---|---|---|
| Specific Gravity at 15.6/15.6 °C | ASTM D 4052-16 | - | 0.9019 |
| Viscosity at 50°C | ASTM D 445-17a | mm2/s | 58.50 |
| Flash Point | ASTM D 93-16a | °C | 71 |
| Gross Calorific Value | ASTM D 240-17 | cal/g | 10,394 |
| Ash | ASTM D 482-13 | % wt | 0.587 |
| Water and Sediment | ASTM D 1796-11(R16) | % vol | 0.05 |
| Sulfur Content | ASTM D 4294-16e1 | % wt | 0.785 |
| Calcium | ASTM D 5708-11 | mg/kg | 3,672 |
| Vanadium | Ashing, Acid Digestion, ICP | mg/kg | 1 |
| Zinc | Ashing, ICP-OES | mg/kg | 1,695 |
| Chloride | IP77/72(04) | mg/kg | Less than 20 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยปกติราคาของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อทดแทนน้ำมันเตาในประเทศไทย จะมีราคาจำหน่ายต่ำกว่าราคาน้ำมันเตา ในช่วง 3-5 บาท/ลิตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการและปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Demand-supply) ในประเทศ

จากข้อมูลดังกล่าว พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Used Lubricating Oil, ULO) เป็นน้ำมันที่มีราคาค่อนข้างต่ำ และมีคุณสมบัติต่างๆ ที่น่าสนใจในการนำมาผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด ค่าปริมาณน้ำ นอกจากนี้น้ำมัน ULO ยังเป็นน้ำมันที่ได้รับการสนับสนุนให้นำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากปัญหาทางสิ่งแวดล้อม จึงเป็นทางเลือกที่มีความน่าสนใจในการนำมาผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ให้มีคุณสมบัติเป็นไปตาม ISO 8217 สำหรับ Residual Marine Fuels

## 2.10 การศึกษาวรรณกรรมการผสมน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันประเภทต่างๆ

เนื่องจากคุณสมบัติที่ยังไม่สามารถใช้น้ำมันไพโรไลซิสได้โดยตรงแทนที่น้ำมันเตาหรือน้ำมันดีเซล จึงมีการศึกษาวิธีที่ประหยัดที่สามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสให้สามารถนำไปใช้ได้ในเชิงพาณิชย์คือการนำไปผสมกับน้ำมันอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น จากการศึกษาวรรณกรรมพบกว่าถ้าหากไม่มีกากตะกอน (Sludge) ที่เกิดขึ้นจากการผสมน้ำมันแล้ว คุณสมบัติของน้ำมันที่ผสมได้จะอยู่ในช่วงของน้ำมันทั้ง 2 ที่นำมาผสม ตามกฎการผสมผลิตภัณฑ์ (Mixing Rule) โดยตารางที่ 20 แสดงการผสมน้ำมันไพโรไลซิสและน้ำมันประเภทอื่นๆ จากการศึกษาวรรณกรรม

ตารางที่ 20 การศึกษาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมนำมันไพโรไลซิส

| ชนิดของน้ำมันไพโรไลซิส | ผสมกับ | การนำไปใช้งาน | ข้อสรุปที่สำคัญ | อ้างอิง |
|---|---|---|---|---|
| น้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลไม้จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis oil of woody biomass) | เอทานอล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | การเพิ่มเอทานอล 10-20% จะทำให้ atomization ของน้ำมันผสมดีขึ้น อัตราการกินน้ำมันสูงกว่าการใช้ดีเซลปกติในเครื่องยนต์เนื่องจากน้ำมันผสมมีค่าความร้อนน้อยกว่า | (Beld, Holle, & Florijn, 2018) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| น้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์เก่า (Waste tire pyrolysis oil) | น้ำมันดีเซล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | น้ำมันผสมแสดงให้เป็นถึงแรงบิดและกำลังที่ได้เหมือนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ ซึ่งน้ำมันผสมสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องปรับปรุงเครื่องยนต์ | (Hürdoğan, Ozalp, Kara, & Ozcanli, 2017) |
| น้ำมันไพโรไลซิสจากขี้เลื่อยของไม้เนื้ออ่อนจากการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis oil of softwood sawdust) | น้ำมันปลาสกัดจากปลาซัลมอน (Fish oil extracted from salmon waste) | ทดแทนน้ำมันเตาหรือน้ำมันคุณภาพต่ำ | น้ำมันทั้ง 2 ไม่ผสมกันเนื่องจากมีขั้วที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ดี การเพิ่ม Methanol 10% ทำให้เพิ่มการผสมกันได้ | (Krutof & Hawboldt, 2016) |
| น้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์เก่า (Tire waste pyrolysis oil) | น้ำมันดีเซล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | น้ำมันผสมที่ได้มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ขององค์กรที่เกี่ยวข้องและสามารถผสมกันได้ดี | (Umeki, de Oliveira, Torres, & Santos, 2016) |
| น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติก (Plastic pyrolysis oil) | น้ำมันดีเซล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | ปริมาณที่มากขึ้นของน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกส่งผลดีต่อประสิทธิภาพและอัตราการกินน้ำมัน โดย 30% ของน้ำมันไพโรไลซิสเป็นปริมาณที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสีย | (Nileshkumar et al., 2015) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| น้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวล (Biomass pyrolysis oil) | เอทานอล | ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำความร้อนให้กับบ้านเรือน | การผสมกัน 20% ของน้ำมันไพโรไลซิสและ 80% ของเอทานอลสามารถนำไปใช้ในหม้อต้มไอน้ำระดับบ้านเรือนได้ โดยที่มีการปลดปล่อยไอเสียเหมือนน้ำมันเตาประเภทที่ 2 | (Martin & Boateng, 2014) |
| น้ำมันไพโรไลซิสจากกากตะกอนสิ่งปฏิกูล (Intermediate pyrolysis oil from sewage sludge) | น้ำมันไบโอดีเซล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | ไม่มีการแยกชั้น แต่พบว่าหัวฉีดของเครื่องยนต์มีคาร์บอนเกาะจำนวนมากซึ่งทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ต่ำลง | (Y. Yang, Brammer, Samanya, Hossain, & Hornung, 2013) |
| น้ำมันไพโรไลซิสจากเนื้อในเมล็ดปาล์มจากการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis oil of palm kernel) | น้ำมันดีเซล เอทานอล และบิวทานอล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | การใช้บิวทานอลในการผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการผสมระหว่างน้ำมันทั้งสองและเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้กับน้ำมันผสม | (Weerachanchai, Tangsathitkulchai, & Tangsathitkulchai, 2009) |
| น้ำมันไพโรไลซิสจากเศษต้นสนและไม้พาเลทต้นสน (Slow pyrolysis oil of pine chips and pine pellets) | น้ำมันไบโอดีเซล | ทดแทนน้ำมันดีเซล | น้ำมันที่เหนียวจากส่วนล่างของน้ำมันไพโรไลซิสจะเป็นส่วนที่เหมาะสมในการผสมกับไบโอดีเซลมากกว่าน้ำมันส่วนบนที่เป็น | (Garcia-Perez et al., 2007) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ส่วนผสมของกรดที่มีขั้วหรือส่วนที่เป็นน้ำ | |

แม้ว่าจะมีการศึกษาการรีไซเคิลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วอย่างมากมาย แต่ยังไม่พบการศึกษาการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมาผสมเพื่อสร้างเป็นน้ำมันที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้นจากวรรณกรรม การผสมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะเป็นการหาแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการจัดการขยะอันตราย ซึ่งพิจารณาคุณสมบัติเบื้องต้นและการเข้ากันได้แล้ว น้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

## 2.11 น้ำมันเตากำมะถันต่ำ (Low sulfur fuel oil, LSFO)

น้ำมันเตากำมะถัน 0.1% (Ultra Low Sulfur Fuel Oil, ULSFO) มีการใช้อย่างแพร่หลายแล้วในบริเวณ ECAs ที่มีการควบคุมปริมาณกำมะถันต่ำ ที่ถูกประกาศโดย IMO นับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2558 โดยปกติ ผู้ผลิตจะใช้กระบวนการผสมน้ำมันที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ ได้แก่ น้ำมันแก๊สออยล์ 0.05%S (Gas Oil 0.05%S) และน้ำมันเตาปกติ 3.5%S (FO 3.5%S) ในอัตราส่วน 70:30 โดยประมาณ เพื่อผลิตน้ำมันออกมาจำหน่าย ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำมันเตากำมะถัน 0.1% สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำมันเตากำมะถัน 0.1% จาก Shell
(ที่มา: https://www.shell.com/business-customers/marine/fuel/ulsfo.html)

| Items | ULSFO Specification |
|---|---|
| Density, kg/m3 | 790-910 |
| Viscosity @ 50 °C, mm2 /s | 10 – 60 |
| CCAI | 800 |
| Sulfur, mass % | <0.1 |
| Flash point, °C | >60 |
| Hydrogen sulfide, mg/kg | <2 |
| Acid Number, mg KOH/g | <0.5 |
| Total Sediment aged, mass % | 0.01 - 0.05 |

| | |
|---|---|
| Total Sediment potential , mass % | 0.01 - 0.05 |
| Carbon Residue, mass % | 2 |
| Pour Point, ℃ | 18 |
| Water Volume % | 0.05 |
| Ash mass % | 0.01 |
| Aluminium plus silicon, mg/kg | 12 – 20 |
| Vanadium, mg/kg | 2 |
| Sodium, mg/kg | 10 |
| Used Lubricating Oil | Free from ULO |

ราคาของน้ำมันเตากำมะถัน 0.1%S (ULSFO) ใกล้เคียงกับราคาน้ำมัน MGO และสูงกว่าน้ำมัน IIFO 380 อยู่ในระดับ 200-240 เหรียญสหรัฐต่อตัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 25-27

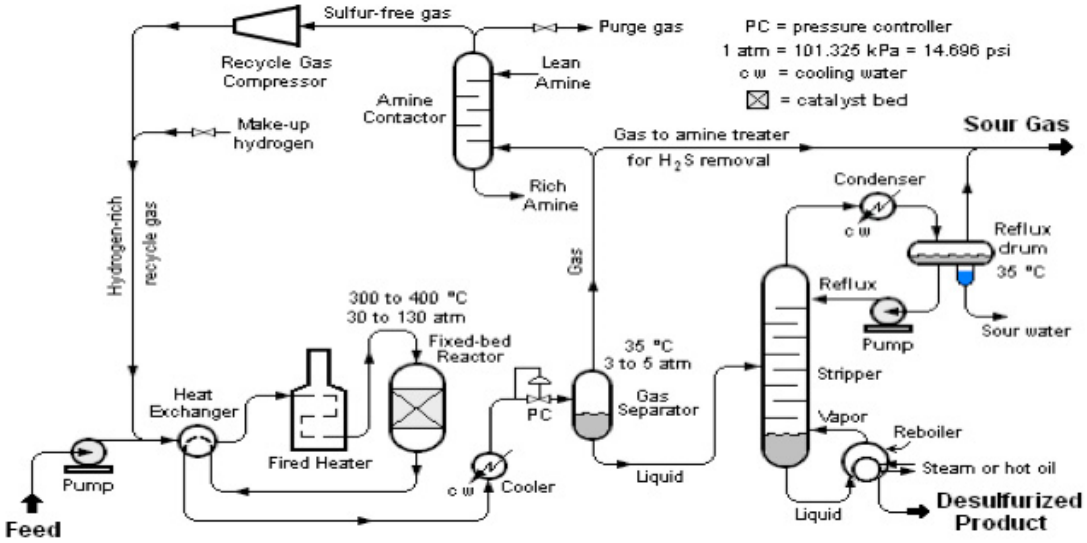
รูปที่ 25 ราคาน้ำมัน ULSFO ช่วงปี ค.ศ. 2017-2018 ที่ Rotterdam, Netherland
(ที่มา: https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#ULSFO)

รูปที่ 26 ราคาน้ำมัน MGO ช่วงปี ค.ศ. 2017-2018 ที่ Rotterdam, Netherland
(ที่มา: https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO)

รูปที่ 27 ราคาน้ำมัน IFO 380 ช่วงปี ค.ศ. 2017-2018 ที่ Rotterdam, Netherland
(ที่มา: https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#IFO380)

ในส่วนของน้ำมันเตากำมะถันต่ำ 0.5%S (LSFO) โรงกลั่นปิโตรเลียมยังอยู่ระหว่างการศึกษาแนวทางการผลิตอื่นๆ เพิ่มเติม นอกเหนือจากแนวทางการผสมน้ำมันที่กำมะถันต่ำกับน้ำมันเตาปกติ กระบวนการและเทคโนโลยีที่ใช้ในการลดปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม คือ กระบวนการ Hydrodesulfurization (HDS) ด้วยการใช้ไฮโดรเจน ($H_2$) และสารเร่งปฏิกิริยาในการจับกำมะถันเป็น

ก๊าซไข่เน่า ($H_2S$) ที่อุณหภูมิและความดันสูง ตามรูปที่ 28 อย่างไรก็ดี HDS เป็นกระบวนการที่มีค่าการลงทุนสูง และค่าใช้จ่ายในการผลิตไฮโดรเจนยังมีราคาสูงมาก จึงเป็นเรื่องยากที่โรงกลั่นจะลงทุนการผลิตผ่านกระบวนการดังกล่าว




รูปที่ 28 กระบวนการ Hydrodesulfurization ในโรงกลั่นปิโตรเลียม

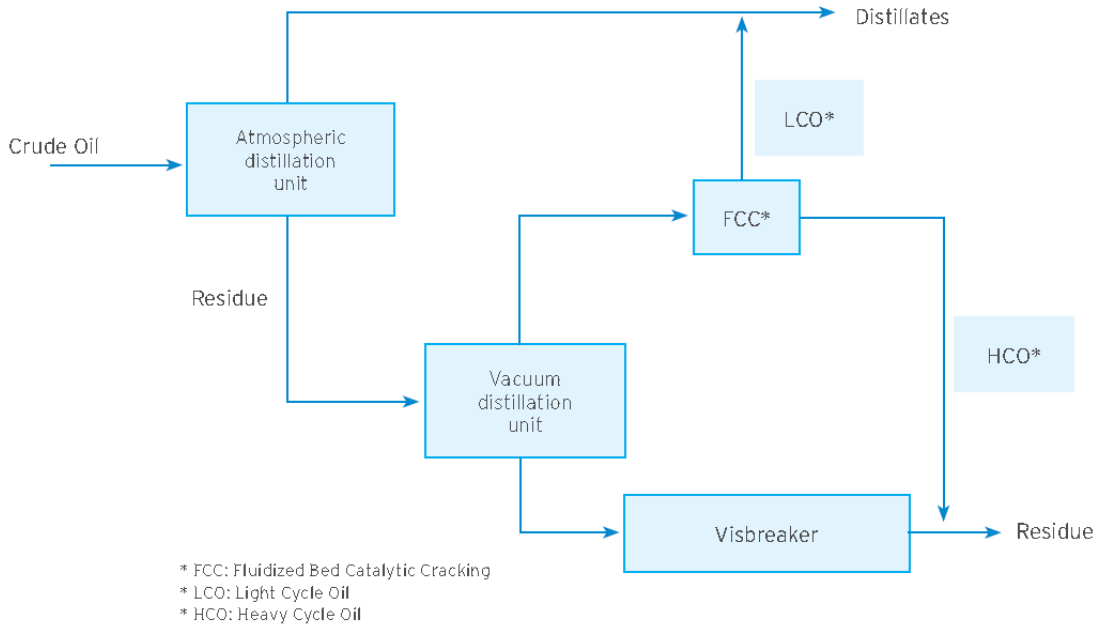
(ที่มา: http://www.maveng.com/index.php/business-streams/industrial/refining/hydrodesulfurization)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**2.12 เชื้อเพลิงในเรือขนส่ง (Marine Fuel)**

นับตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 19 จนถึงกลางศตวรรษที่ 20 เรือขนส่งในเชิงพาณิชย์มีการปรับเปลี่ยนจากเรือที่ใช้ใบที่ต้องอาศัยแรงลมในการขับเคลื่อน เป็นเรือที่ใช้เครื่องจักรไอน้ำ และในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 เรือที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้าถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายจวบจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีการพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลในเรือขนส่งมาเรื่อยๆ จนกระทั่งเครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้าในเรือขนส่งสามารถใช้น้ำมันหนักได้ (Heavy fuel oil, HFO) โดยการใช้น้ำมันเตาในเครื่องยนต์ดีเซลของเรือเริ่มเป็นที่แพร่หลายตั้งแต่ปลายคริสตศักราชที่ 1960 และนับตั้งแต่ศตวรรษที่ 21 เป็นต้นมา เรือที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้ามีปริมาณถึง 98% ของจำนวนกองเรือทั้งหมดทั่วโลก โดยเรือขนาดใหญ่ส่วนใหญ่สามารถใช้ได้ทั้งน้ำมันดีเซล (MGO) หรือน้ำมันหนัก (HFO) แต่เรือขนาดเล็กยังต้องใช้น้ำมันดีเซลเป็นหลัก ทั้งนี้ ราคาของ MGO และ MDO ยังมีราคาสูงกว่า IFO ค่อนข้างมาก จึงทำให้ผู้ประกอบการขนส่งยังเลือกใช้ IFO เป็นเชื้อเพลิงหลัก

โรงกลั่นปิโตรเลียมมีกระบวนการผลิตน้ำมันต่างๆ ที่มีความซับซ้อนและหลากหลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่โรงกลั่นต้องการ นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา โรงกลั่นต่างๆ มีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากมีความพยายามในการผลิตน้ำมันเบนซินมากขึ้น ตัวอย่างการผลิตน้ำมันจากโรงกลั่นที่มีระบบ Fluidized bed Catalytic Cracking (FCC) และ Visbreaking ดังรูปที่ 29




รูปที่ 29 การผลิตน้ำมันประเภทต่างๆ จากโรงกลั่นมีมีระบบ FCC และ Visbreaking (ที่มา: http://www.chevronmarineproducts.com/)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.12.1 Marine Gas Oil (MGO)

MGO คือน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (High Speed Diesel) ที่ใช้โดยทั่วไปแต่อาจจะเพิ่มการใส่สีเพื่อบ่งชี้เรื่องข้อยกเว้นของภาษีสรรพากร โดย MGO มีค่าซีเทนสูงและระเหยเร็ว ตามข้อกำหนดของ ISO 8217:2017-03 ที่เป็นมาตรฐานของน้ำมันสำหรับเรือขนส่งแบ่ง MGO เป็น DMX, DMA, DFA, DMZ, และ DFZ ตามค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะค่าความหนืด รวมถึงปริมาณ Fatty acid methyl ester (FAME) ที่สามารถเติมใน MGO ได้

2.12.2 Marine Diesel Oil (MDO)

MDO คือน้ำมันดีเซลหมุนช้า (Low Speed Diesel) โดยเป็นน้ำมันที่มีค่าซีเทนต่ำกว่า และความหนาแน่นสูงกว่า MGO เกิดจากการผสมน้ำมัน MGO กับ HFO โดยมีปริมาณของ HFO ไม่มาก

ตามข้อกำหนดของ ISO 8217:2017-03 แบ่ง MDO เป็น DMB และ DFB ที่แตกต่างกันที่ปริมาณ FAME

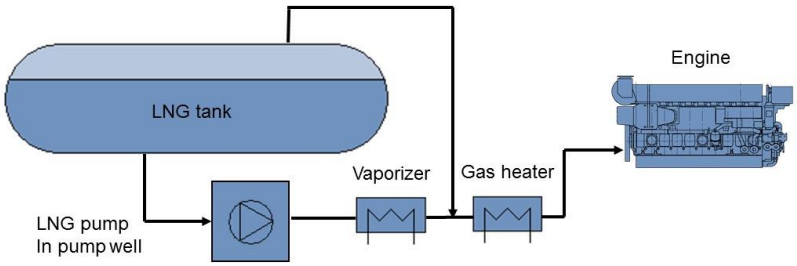
2.12.3 Intermediate Fuel Oil (IFO)

IFO คือน้ำมันที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง MGO กับ HFO โดยมีปริมาณของ HFO ค่อนข้างสูง ตามข้อกำหนดของ ISO 8217:2017-03 แบ่ง IFO เป็น RMB, RMD, RME, RMG และ RMK ที่ควบคุมปริมาณกำมะถันที่ 3.5% โดย IFO 180 และ IFO 380 (RMG) เป็นน้ำมันที่นิยมใช้มากที่สุดในเรือขนส่ง

2.12.4 Liquefied natural gas (LNG)

LNG เริ่มมีความนิยมนำไปใช้ในเรือขนส่งโดยเป็นเชื้อเพลิงทดแทน Marine fuel ทั้ง MGO, MDO หรือ IFO โดยมีการปลดปล่อยมลภาวะค่อนข้างต่ำ ซึ่งถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงแห่งอนาคตที่ผ่านกฎระเบียบที่เข้มงวดด้านสิ่งแวดล้อม โดยมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ต่ำมาก ซึ่งจากการคาดการณ์อนาคตและทิศทางของ Marine fuel ที่ต้องลดปริมาณปลดปล่อยก๊าซทั้งสองเพิ่มมากขึ้นเพื่อการปกป้องสิ่งแวดล้อมแล้ว ผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ว่าการใช้ LNG เป็นเชื้อเพลิงในเรือขนส่งจะมีเพิ่มมากขึ้น โดยแม้ว่าในปัจจุบันจะยังไม่มีกฎระเบียบที่ควบคุมการใช้และการจัดเก็บ LNG ให้เป็นมาตรฐาน แต่ขณะนี้มีการพัฒนาจากหลากหลายองค์กร รวมไปถึง the Society for Gas as Marine Fuel (SGMF), IMO และ ISO ดังนั้น ในขณะนี้ LNG จึงยังไม่ถูกระบุใน ISO 8217 ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง

การใช้ LNG ในเรือขนส่งต้องเป็นเรือขนส่งที่ติดตั้งระบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Vaporizer) อุปกรณ์ลดความดัน (Regulator) เครื่องผสมแก๊ส (Gas Mixer) มีถังบรรจุก๊าซที่เก็บด้วยความเย็นต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเรือที่สร้างขึ้นมาใหม่และมีระบบดังกล่าวในการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 30




รูปที่ 30 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ LNG ในเรือขนส่ง

*(ที่มา: http://marine-service-noord.com/three-design-concepts-for-lng-fuel-systems/)*

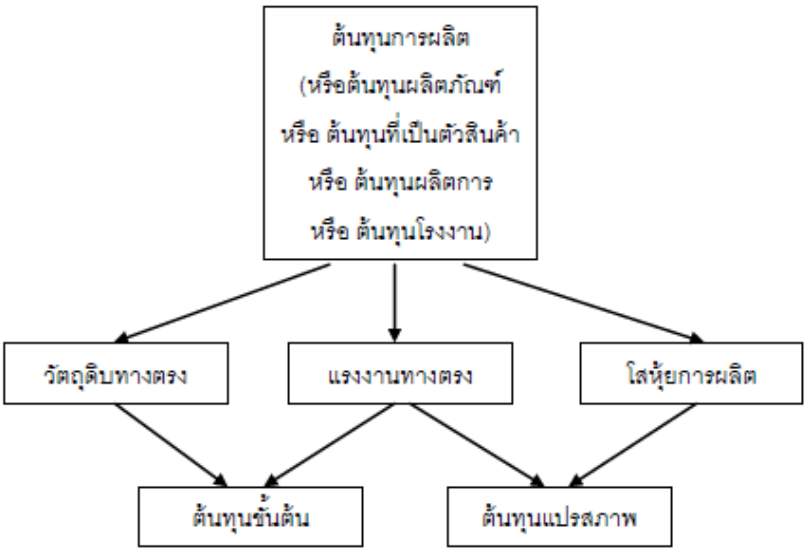
## 2.13 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต

2.13.1 องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต

1) ค่าต้นทุนวัตถุดิบทางตรง (Direct Material) คือ วัตถุดิบที่เป็นส่วนสำคัญในการผลิตโดยตรงของสินค้า
2) ค่าแรงต้นทุนแรงงานทางตรง (Direct Labor) คือ ค่าแรงงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบทางตรงให้เป็นสินค้า
3) ค่าใช้จ่ายในการผลิตหรือค่าโสหุ้ยการผลิต (Overhead Cost) ประกอบไปด้วยต้นทุนการผลิตอื่นๆ ที่ไม่สามารถคำนวณต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง
    ก. ค่าวัตถุดิบทางอ้อม (Indirect Material) คือ วัสดุที่ต้องใช้ในการผลิตสินค้าสำเร็จรูป แต่ไม่สามารถจำแนกเป็นวัตถุดิบทางตรงได้ เพราะไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทำงาน
    ข. แรงงานทางอ้อม (Indirect Labor) คือ แรงงานที่ไม่สามารถคำนวณต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง เช่น เงินเดือนของพนักงานในส่วนอื่นๆ ที่ไม่ใช่ส่วนการผลิตโดยตรง
    ค. ค่าใช้จ่ายโรงงาน ค่าค่าอื่นๆ ที่นอกเหนือจากค่าวัตถุดิบทางอ้อม และค่าแรงงานทางอ้อม เช่น ค่าสวัสดิการ ค่าสาธารณูปโภค ค่าเสื่อมเครื่องจักร ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร

จากการแบ่งต้นทุนการผลิตเป็น 3 ประเภท คือ ค่าต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ค่าแรงงานทางตรง และค่าใช้จ่ายการผลิต ในทางบัญชีต้นทุนจะทำการรวมต้นทุนการผลิตบางประเภทเข้าด้วยกัน โดยจำแนกเป็นชนิดของต้นทุน 2 ชนิด คือ ต้นทุนขั้นต้น (Prime Cost) และต้นทุนแปรสภาพ (Conversion Cost) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุนผลิตภัณฑ์ได้ดังรูปที่ 31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 31 การจำแนกต้นทุนการผลิต
(จีรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์, 2014)

2.13.2 ชนิดของต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิตสามารถแบ่งได้เป็นต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost)

1) ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost, FC)

คือ ต้นทุนที่ไม่เกี่ยวข้องกับปริมาณการผลิตของสินค้า ได้แก่ เงินเดือนพนักงาน ค่าเช่า ค่าเสื่อมราคา ค่าประกันภัย ค่าการตลาด ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด

2) ต้นทุนผันแปร (Variable Cost, VC)

คือ ต้นทุนที่แปรผันตามปริมาณการผลิตสินค้า ได้แก่ ค่าวัตถุดิบ ค่าแรงทางตรง ค่าใช้จ่ายในการผลิตทางตรง

ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยเป็นต้นทุนผันแปร สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย} = \frac{\text{ค่าวัตถุดิบ} + \text{ค่าแรงทางตรง} + \text{ค่าใช้จ่ายในการผลิตทางตรง}}{\text{จำนวนหน่วยที่ผลิตได้}}$$

ต้นทุนรวมสินค้าต่อหน่วย ต้องรวมต้นทุนคงที่เข้ามาคำนวณเป็นต้นทุนด้วย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\text{ต้นทุนรวมสินค้าต่อหน่วย} = \frac{\text{ต้นทุนการผลิต} + \text{ค่าใช้จ่ายในการขายและการดำเนินการ}}{\text{จำนวนหน่วยที่ผลิตได้}}$$

**2.14 การวิเคราะห์ด้านการเงินของโครงการ (Project Financial Analysis)**

การวิเคราะห์ทางด้านการเงินของโครงการเป็นกระบวนการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านการเงินของโครงการก่อนที่จะลงทุน โดยสร้างแบบจำลองทางการเงินที่ประกอบไปด้วยเงินลงทุนเบื้องต้น ประมาณการยอดขาย ประมาณการราคาขาย ประมาณการต้นทุน ต้นทุนเฉลี่ยของเงินลงทุน อัตราดอกเบี้ย ฯลฯ ซึ่งผู้ลงทุนอาจจะมีหลายโครงการและทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการหลายๆ โครงการ เพื่อทำการคัดเลือกโครงการที่มีความน่าสนใจเพื่อลงทุน โดยมีตัวชี้วัดที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

2.14.1 NPV (Net Present Value)

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลรวมกระแสเงินสดจ่ายสุทธิและกระแสเงินสดรับสุทธิ โดยมีตัวแปรคือ ต้นทุนเฉลี่ยของเงินลงทุน (WACC, Weighted Average Cost of Capital) และระยะเวลาของโครงการทั้งหมด โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$NPV = -A + \sum_{i=1}^{T} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

โดยที่ A คือ เงินลงทุนเริ่มต้น

C คือ กระแสเงินสด

T คือ ระยะเวลาของโครงการ

r คือ อัตราลดค่า (Discount Rate) ในที่นี้ใช้เป็น WACC

โครงการที่ดีที่สุดจะมีค่า NPV เป็นบวกและมีค่ามากที่สุด ส่วนโครงการที่มี NPV ติดลบคือโครงการที่มีผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับน้อยกว่าเงินที่ต้องลงทุนทั้งหมด

2.14.2 IRR (Internal Rate of Return)

IRR คือ ผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้ โดยการคำนวณเป็นการหาอัตราลดค่า (Discount Rate) ที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับ 0 มีสูตรคำนวณเดียวกับ NPV โดยที่ถ้า IRR มีค่ามากกว่า WACC จะถือได้ว่าเป็นโครงการที่น่าลงทุน และ IRR ยิ่งมีค่ามาก โครงการถือว่ามีความน่าลงทุนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.14.3 PB (Payback Period)

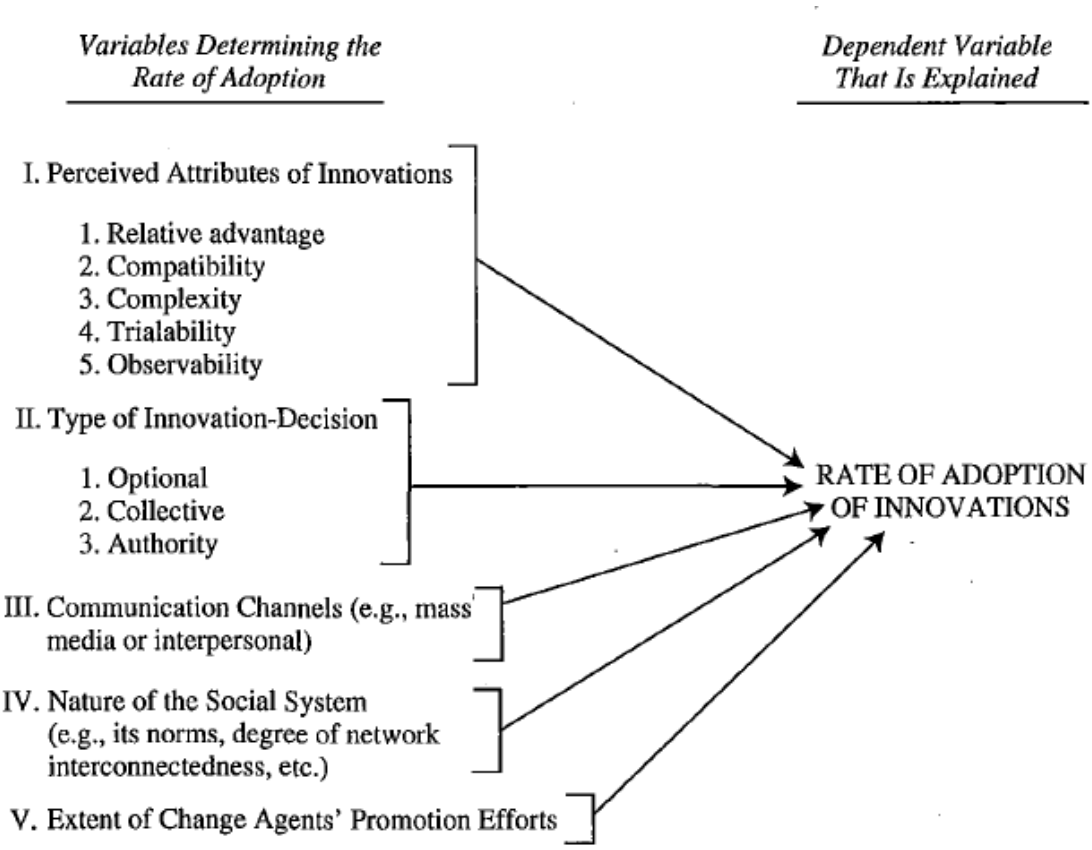
PB คือ ระยะเวลาการคืนทุน เป็นระยะเวลาของการลงทุนที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากโครงการเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายสุทธิ หรือเป็นระยะเวลาที่เงินที่ได้เท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น ซึ่งโครงการที่มีระยะเวลาการคืนทุนน้อยกว่ามีความน่าสนใจในการลงทุนมากกว่า อย่างไรก็ดี ตัวชี้วัดนี้เป็นการคำนวณแบบง่าย โดยที่ยังไม่มีการคำนึงถึงค่าของเงินตามเวลา

## 2.15 ปัจจัยที่มีผลต่อผู้บริโภคในการยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่

จากทฤษฎีการแพร่กระจายนวัตกรรม (Diffusion of Innovations) ของ Rogers (1983) ปัจจัยที่มีผลต่อผู้บริโภคในการยอมรับผลิตภัณฑ์ใหม่ มี 5 ประการ ดังนี้ (รูปที่ 32)

1) การเปรียบเทียบประโยชน์ที่จะได้รับกับสินค้าที่มีอยู่เดิม (Relative Advantage) ซึ่งระดับของประโยชน์มักใช้การพิจารณาจากด้านราคาผลิตภัณฑ์ ผลทางสังคม และประโยชน์อื่นๆ
2) ความเข้ากันได้ (Compatibility) คือ ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่จะนำมาใช้ต้องมีความเข้ากันได้กับสภาวะของผู้ซื้อ ประสบการณ์ในอดีต และความต้องการในอนาคต
3) ความซับซ้อน (Complexity) คือ ระดับความยากในการใช้งานผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยผลิตภัณฑ์ที่มีความง่ายในการใช้งาน จะทำให้เกิดการยอมรับจากผู้บริโภคได้ง่าย
4) การทดลองใช้ได้ (Trialability) คือ การที่ผลิตภัณฑ์ใหม่นั้นสามารถนำไปทดลองใช้งานได้หรือสามารถแยกนำไปทดลองได้บางส่วน จะทำให้เกิดการยอมรับจากผู้บริโภคได้ง่ายขึ้น
5) การสังเกตเห็นได้ (Observability) คือ การที่ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนวัตกรรมสามารถเป็นที่สังเกตเห็นได้ง่ายจากผู้อื่น สามารถสื่อสารให้ผู้อื่นเข้าใจง่าย จะทำให้เกิดการยอมรับได้ดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 32 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการยอมรับนวัตกรรม

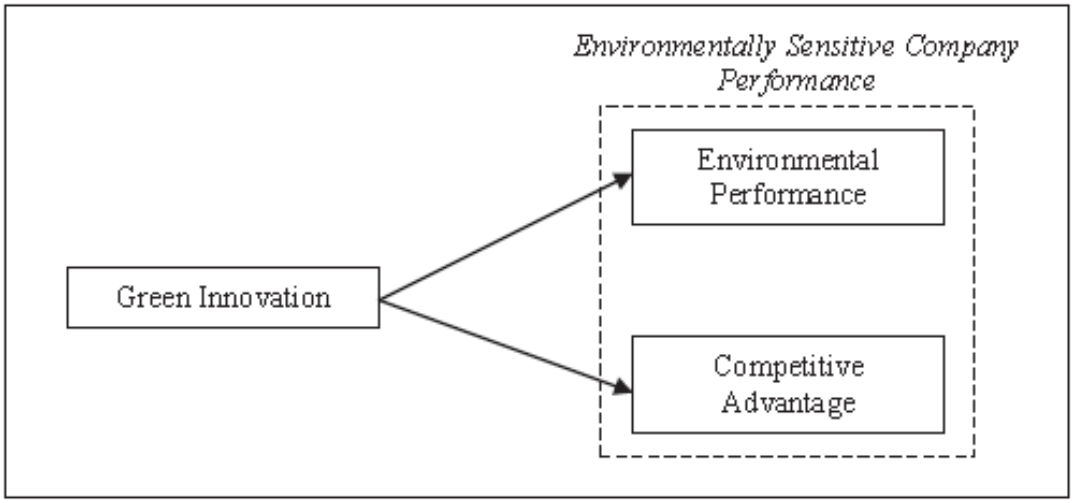
(Rogers Everett, 1995)

**2.16 นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม (Green Innovation)**

การใช้ทรัพยากรธรรมชาติตามการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วของโลกส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยิ่ง และก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆ มากมาย หลายประเทศพยายามออกกฎระเบียบในการลดการใช้พลังงานลง และลดการปลดปล่อยคาร์บอน กฎระเบียบต่างๆ นั้น ไม่เพียงแต่การสร้างความตระหนักในปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างจริงจัง แต่ยังทำให้หลายๆ องค์กรในประเทศต่างๆ ปรับปรุงกระบวนการทำงาน กระบวนการผลิต การแข่งขันในเชิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีความคาดหวังว่าจะทำให้ภาพลักษณ์ขององค์กรดีขึ้น และสร้างสมรรถภาพในการแข่งขันให้มากยิ่งขึ้น

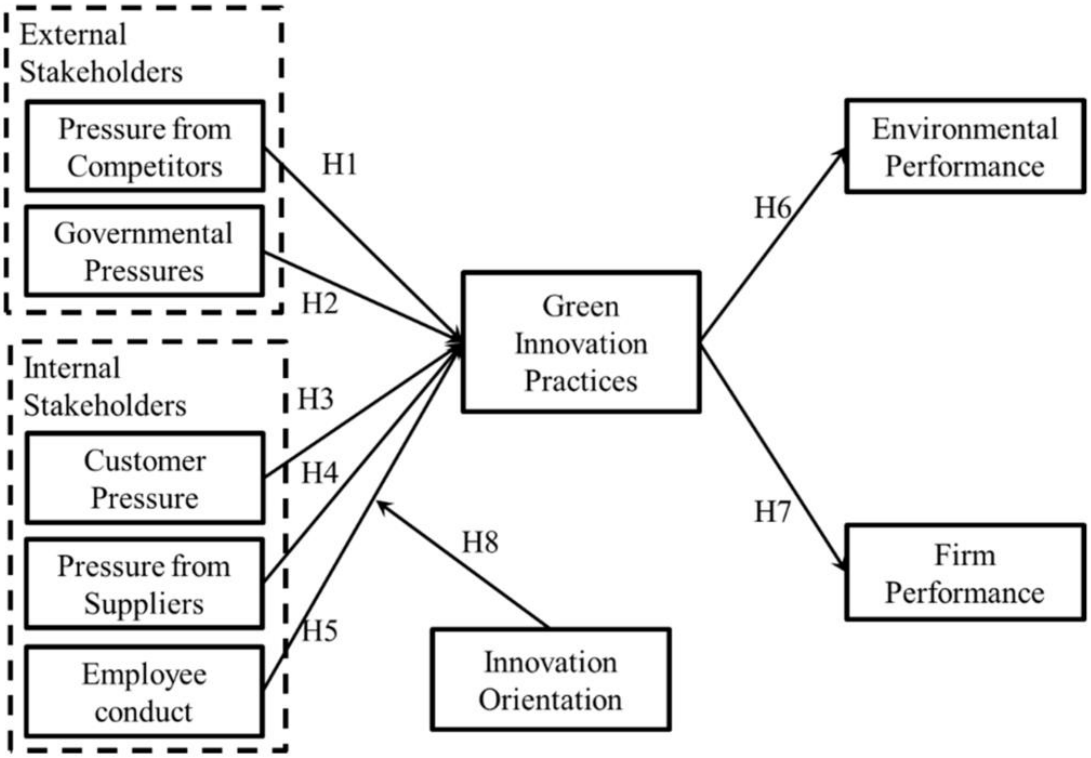
นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมในแง่ขององค์กร คือ วิธีการหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยเกี่ยวข้องกับการพัฒนาเชิงเทคนิคด้วยแนวทางใหม่ๆ ที่พัฒนาผลงานในด้านสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้นและสร้างความสามารถในเชิงแข่งขันให้องค์กรให้มีความยั่งยืน (Y.-S. Chen, Lai, & Wen, 2006) ซึ่งกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมนั้นอาจจะนำไปสู่สถานการณ์ที่เป็น

win-win ทั้งบริษัทที่ได้ผลกำไรมากขึ้น และการลดมลภาวะให้กับโลก โดยพบว่านวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมได้ช่วยเพิ่มผลประกอบการด้านสิ่งแวดล้อมที่ดี และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้กับองค์กรได้ (Küçükoğlu & Pınar, 2015) ดังแสดงในรูปที่ 33




รูปที่ 33 นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมและผลที่ดีต่อองค์กร
(Küçükoğlu & Pınar, 2015)

ปัจจุบันแต่ละองค์กรพยายามแสวงหาวิธีที่นำกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาปรับใช้ในองค์กร ในการที่จะสร้างหรือนำนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมมาปรับใช้ องค์กรต้องคำนึงถึงลูกค้า ความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซัพพลายเออร์ และกฎระเบียบของรัฐที่เกี่ยวข้อง โดย Weng และคณะ (Weng, Chen, & Chen, 2015) ได้เขียนแบบจำลองความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ในองค์กรไว้ดังรูปที่ 34




รูปที่ 34 แบบจำลองความสัมพันธ์การนำนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ในองค์กร (Weng et al., 2015)

**2.17 กรอบแนวคิดการวิจัย**

จากปัญหาเรื่องความต้องการน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการประกาศของ IMO ความยากลำบากในการผลิตน้ำมันดังกล่าวจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม การศึกษาทบทวนวรรณกรรม และการศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยมีแนวทางในการพัฒนานวัตกรรมน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เพื่อสร้างนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมที่มีความยั่งยืน รวมถึงการศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำมันผสมดังกล่าว นอกจากนี้ผู้วิจัยมีการศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์โดยการศึกษาข้อมูลจากผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดกับประกาศของ IMO เรื่องน้ำมันเตากำมะถันต่ำดังกล่าว ได้แก่ ผู้ผลิต ได้แก่ โรงกลั่นน้ำมัน (Refineries) ผู้จำหน่าย ได้แก่ เทรดเดอร์ (Traders) ผู้ใช้ ได้แก่ เจ้าของเรือขนส่ง (Ship owners) และผู้ควบคุมกฎ ได้แก่ กรมเจ้าท่า (Marine Department)

# บทที่ 3
# ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่องการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว แบ่งออกเป็น 3 ระยะตามวัตถุประสงค์หลักของการวิจัย โดยมีแนวทางการศึกษาวิจัยใน 3 ระยะการศึกษาดังนี้ (รูปที่ 35)

ระยะการศึกษาที่ 1 ทำการทดลองการผลิตและศึกษาต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก

ระยะการศึกษาที่ 2 พัฒนานวัตกรรมการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำด้วยการผสมน้ำมัน รวมถึงศึกษาต้นทุนการผลิตและคุณสมบัติตามมาตรฐาน ISO 8217 Residual marine fuels

ระยะการศึกษาที่ 3 ศึกษาแนวทางการนำนวัตกรรมไปใช้ในเชิงพาณิชย์ (Commercialization)

รูปที่ 35 ขั้นตอนการวิจัย

## 3.1 การทดลองการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

ก. เตาอบไล่ความชื้น

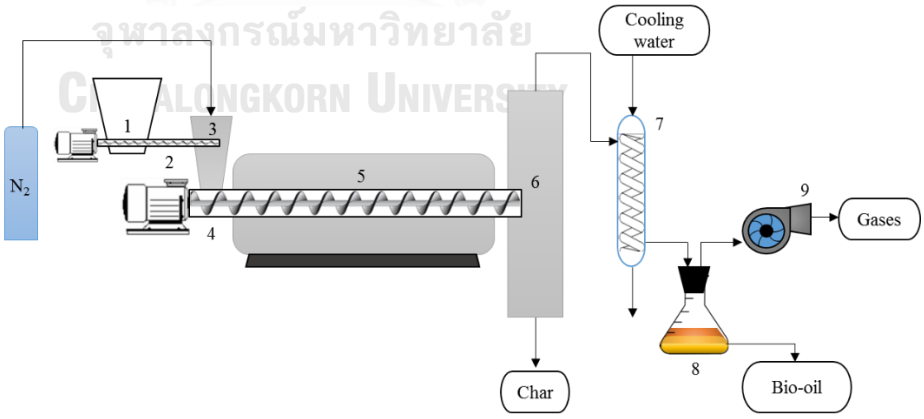
เป็นเตาระบบลมร้อนที่ใช้ลดความชื้นในสาหร่ายขนาดเล็กก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยตั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการลด

ความชื้นของสาหร่ายแห้งอีกครั้งก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้แนวทางจาก ASTM D4442

ข. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร

แสดงดังรูปที่ 36 โดยมีโครงแผนภาพดังรูปที่ 37

รูปที่ 36 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร




รูปที่ 37 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร

หมายเลขที่ 1: ตัวเก็บสารสำหรับใส่ชีวมวล (Hopper 1)

หมายเลขที่ 2: ชุดสกรูขนาด 40 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร (Screw feeder 1)

หมายเลขที่ 3: ตัวเก็บสารระบบปิดเพื่อป้องกันอากาศเข้าในระบบ (Hopper 2)

หมายเลขที่ 4: ชุดสกรูขนาด 120 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (Screw feeder 2)

หมายเลขที่ 5: เตาเผา (Tube furnace)

หมายเลขที่ 6: ตัวแยกสารสำหรับแยกถ่านชาร์ (Char separation)

หมายเลขที่ 7: ตัวควบแน่นสารด้วยน้ำ (Water condenser)

หมายเลขที่ 8: ขวดเก็บน้ำมันชีวภาพ (Flask)

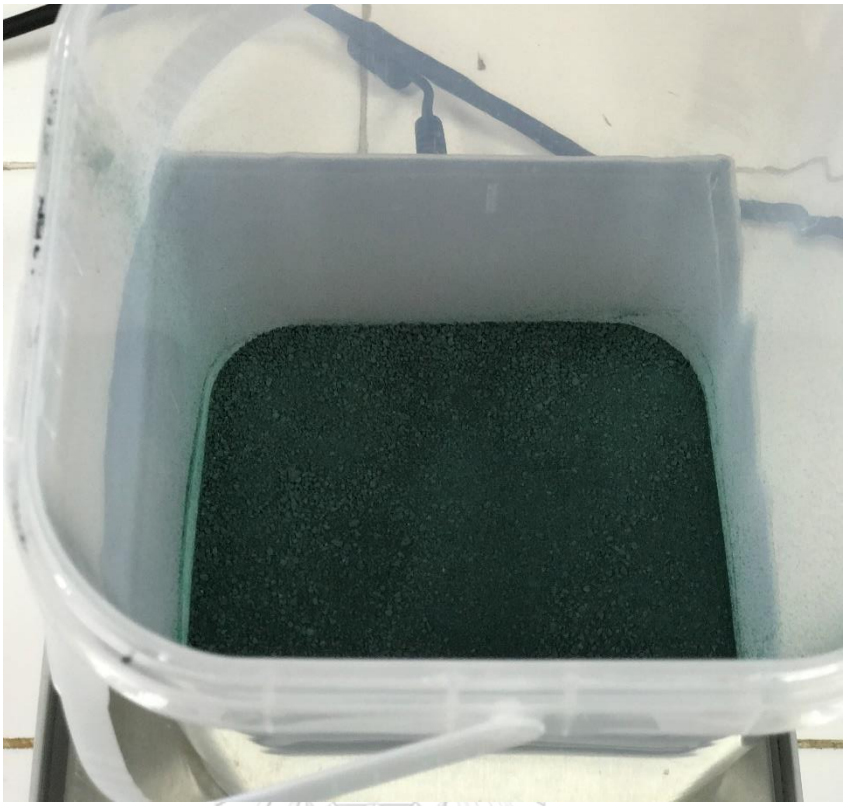
หมายเลขที่ 9: ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

โดยหมายเลขที่ 1 และ 2 จะเป็นตัวพักสาหร่ายก่อนถูกลำเลียงไปยังส่วนต่อไป โดยหมายเลขที่ 3 และ 4 จะเป็นชุดสกรูพาสาหร่ายเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์หมายเลขที่ 5 ซึ่งในเตาเผานี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะถูกสกรูพาไปยังหมายเลขที่ 6 ซึ่งแยกถ่านชาร์ออกสู่ด้านล่าง และแก๊สที่ได้จะเคลื่อนไปสู่หมายเลข 7 ซึ่งจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ และส่วนที่เหลือที่เป็นแก๊สสังเคราะห์จะถูกหมายเลข 9 ดูดออกไป โดยในเครื่องปฏิกรณ์มีถังแก๊สไนโตรเจนที่มีการควบคุมอัตราการไหลด้วยโรตามิเตอร์ที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศและออกซิเจนภายนอกเข้าสู่ระบบ

Chulalongkorn University

2) วัตถุดิบ

เป็นสาหร่ายแห้งพันธุ์สไปรูลิน่าที่ซื้อจากฟาร์มนาทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา จำนวน 5 กิโลกรัม มีค่าความชื้นไม่เกิน 10% และมีขนาดไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร (250 ไมครอน) ดังแสดงในรูปที่ 38



รูปที่ 38 สาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผงขนาดไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตรจากฟาร์มสาหร่ายนาทอง

3) กระบวนการทดลองไพโรไลซิส

ก. เริ่มจากการนำสาหร่ายแห้งมาอบไล่ความชื้น 6 ชั่วโมงด้วยลมร้อน 105 องศาเซลเซียส เพื่อการันตีให้สาหร่ายมีความชื้นไม่เกิน 10% ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์

ข. เปิดแก๊สไนโตรเจนที่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อไล่อากาศหรือออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ และใช้อัตราการไหลนี้ เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่มีการทดสอบก่อนหน้าแล้วว่าเป็นอัตราการไหลที่ได้ผลผลิตของเหลวมากที่สุด

ค. เปิดเครื่องปฏิกรณ์และทำการตั้งค่าอุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีการทดสอบก่อนหน้าแล้วว่าได้ผลผลิตของเหลวมากที่สุด

ง. เมื่ออุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ได้ตามกำหนด ปรับความเร็วรอบของสกรูให้เป็น 100 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่มีการทดสอบก่อนหน้าแล้วว่าได้ผลผลิตที่เป็นของเหลวมากที่สุด

จ. เปิดระบบ Water condenser เพื่อทำการควบแน่นสารระเหยที่ได้

ฉ. เปิด Vacuum pump เพื่อดูดแก๊สออกจากเตาปฏิกรณ์ไปสู่การควบแน่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ช. นำสาหร่ายแห้งใสบีกเกอร์จำนวน 500 กรัม ใส่ไปยัง Hopper 1 เพื่อเริ่มการทดลอง

ซ. ชั่งน้ำหนักของแข็ง ของเหลวที่ได้ ต่อ 1 รอบการทดลอง จดบันทึกผลการทดลองและคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ฌ. ทำซ้ำในกระบวนการ ช. จนทำการทดลองครบ 5 กิโลกรัม

ญ. คำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดโดยเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด (Yield of pyrolysis)

**3.2 การคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส**

เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะประกอบไปด้วย ของแข็ง (ถ่านชาร์) ของเหลว (น้ำมันชีวภาพ) และแก๊ส (แก๊สชีวภาพ) การคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดโดยน้ำหนัก สามารถทำได้ดังนี้

1) ผลผลิตของแข็ง (%$W_S$)

$$\%W_S = \frac{W_S \, x \, 100}{W_{DM}}$$

2) ผลผลิตของเหลว (%$W_L$)

$$\%W_L = \frac{W_L \, x \, 100}{W_{DM}}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) ผลผลิตแก๊ส (%$W_G$) โดยผลต่าง (By difference)

$$\%W_G = 100 - \%W_S - \%W_L$$

โดย $W_{DM}$ คือ น้ำหนักของสาหร่ายแห้ง (กรัม)

$W_S$ คือ น้ำหนักของของแข็งที่ได้จากกระบวนการ (กรัม)

$W_L$ คือ น้ำหนักของเหลวที่ได้จากกระบวนการ (กรัม)

$W_G$ คือ น้ำหนักของแก๊สที่ได้จากกระบวนการ (กรัม)

### 3.3 การศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ($C_{MPO}$)

ต้นทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ประกอบไปด้วยต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง และต้นทุนการนำมาไพโรไลซิส

1) ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง ($C_{DM}$)

ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้ง ศึกษาโดยการเก็บข้อมูลจากผู้ประกอบการฟาร์มสาหร่ายนาทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา เนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้มาเทียบกับข้อมูลของราคาจำหน่ายสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งที่อื่นๆ โดยต้นทุนในการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การศึกษาเฉพาะต้นทุนทางตรงในการผลิตสาหร่ายแห้ง ได้แก่

1. ค่าวัตถุดิบทางตรง ได้แก่ ค่าสารอาหาร
2. ค่าแรงงานทางตรง ได้แก่ ค่าแรงในการเก็บเกี่ยวสาหร่าย การเติมสารอาหาร การทำให้สาหร่ายแห้ง การบดสาหร่ายให้เป็นผง
3. ค่าใช้จ่ายในการผลิตทางตรง ได้แก่ ค่าน้ำ ค่าไฟ

โดยต้นทุนดังกล่าวถือเป็นต้นทุนผันแปร (Variable cost) ในการผลิตสาหร่ายขนาดเล็ก แต่ยังไม่ได้มีการนำ 1) ค่าลงทุนเริ่มต้น (Initial investment) ได้แก่ ค่าซื้อหรือเช่าที่ ค่าโรงเรือน ค่าก่อสร้างบ่อเลี้ยงสาหร่าย ค่าอุปกรณ์ เครื่องจักร ค่าหัวเชื้อสาหร่าย 2) ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) หรือ ค่าโสหุ้ยการผลิต (Overhead cost) ต่างๆ ได้แก่ ค่าเช่า เงินเดือนพนักงาน ค่าการตลาด ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด ค่าเครื่องมือ ฯลฯ มารวมในการศึกษาต้นทุนสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งในการศึกษานี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$C_{DM} = C_N + C_W + C_E + C_L$$

โดย $C_{DM}$ คือ ต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง (บาท/กิโลกรัม)

$C_N$ คือ ต้นทุนของสารอาหารสาหร่าย (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_W$ คือ ต้นทุนของน้ำในการผลิตสาหร่าย (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_E$ คือ ต้นทุนค่าไฟ ได้แก่ ค่าไฟในการใช้เครื่องอบแห้ง Spray dryer และค่าบดสาหร่ายให้มีอนุภาค 0.25 มิลลิเมตร (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_L$ คือ ค่าแรงของพนักงานในการเก็บเกี่ยวสาหร่ายเป็นหลัก รวมไปถึงการเติมสารอาหาร การอบแห้ง การบดสาหร่ายให้เป็นผง (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

2) ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิส ($C_P$)

ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิสในวิทยานิพนธ์นี้เป็นต้นทุนทางตรงของการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ได้แก่ ค่าไฟในการเดินเครื่อง และค่าแรงของพนักงานเดินเครื่อง

ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิส สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$C_P = C_{EP} + C_{LP}$$

โดย $C_P$ คือ ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิส (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_{EP}$ คือ ต้นทุนค่าไฟของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_{LP}$ คือ ต้นทุนค่าแรงพนักงานเดินเครื่อง บำรุงรักษาเครื่อง และจัดเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

3) ต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ($C_{MPO}$)

ต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ขึ้นอยู่กับปริมาณของผลผลิตของเหลวส่วนที่เป็นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$C_{MPO} = (C_{DM} + C_P)/Y_{MPO}$$

โดย $C_{MPO}$ คือ ต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_{DM}$ คือ ต้นทุนของสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$C_P$ คือ ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิส (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง)

$Y_{MPO}$ คือ % ของผลผลิตที่ได้เป็นน้ำมันไพโรไลซิสจากกระบวนการ (%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 3.4 การศึกษาการผสมน้ำมันเพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

การศึกษาการเลือกน้ำมันที่จะนำมาผสมเพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ มีเกณฑ์ในการคัดเลือก ดังนี้

1) การผสมเข้ากันได้ (Miscibility) กับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก
2) ค่าความร้อน (Heating value)

3) ราคา (Price)

4) ความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม (Green Innovation)

โดยมีตัวเลือกน้ำมันที่จะนำมาผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ น้ำมันเตา (FO) น้ำมันทาร์หนัก (Heavy Tar) น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (ULO) กลีเซอรีนดิบ (Crude Glycerin) และน้ำมันยาง (Tire Pyrolysis Oil, TPO)

**3.5 การผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**

น้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก (MPO) และ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (ULO) ถูกเลือกนำมาผสมด้วยอัตราส่วนตามปริมาตร โดยให้มีปริมาตรรวมแต่ในละการผสมเท่ากับ 250 มิลลิลิตรเพื่อนำไปทดสอบต่อไปและมีชื่อเรียกในการทดลอง ดังนี้

1) MPO 100% และ ULO 0% เรียกว่า MLB100

2) MPO 80% และ ULO 20% เรียกว่า MLB80

3) MPO 50% และ ULO 50% เรียกว่า MLB50

4) MPO 20% และ ULO 80% เรียกว่า MLB20

5) MPO 0% และ ULO 100% เรียกว่า MLB0

การผสมน้ำมันทั้งสองทำด้วยการผสมแบบปกติ ไม่มีการให้ความร้อนระหว่างหรือหลังการผสม เนื่องจากจะทำให้น้ำมัน aging และลดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันทั้งสอง (Krutof & Hawboldt, 2016)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**3.6 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันที่ได้จากการผสมกันระหว่างน้ำมันทั้ง 2 ชนิดในอัตราส่วนต่างๆ**

การศึกษาคุณสมบัติของ MLB ในอัตราส่วนผสมต่างๆ จะใช้การศึกษาคุณสมบัติ ดังนี้

3.6.1 การทดสอบการเข้ากันได้ (Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test)

การทดสอบการเข้ากันได้ของน้ำมันทั้ง 2 ชนิดทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4740 – 02 Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test โดยใช้การหยดน้ำมันผสมในกระดาษทดสอบและใส่ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมง นำกระดาษทดสอบออกมาและดูผลที่ได้เทียบกับ D 4740 Adjunct Reference Spots ดังในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 D 4740 Adjunct Reference Spots (ASTM D4740 - 02)

| Reference Spot No. | Characterizing Features |
|---|---|
| 1 | Homogeneous spot (no inner ring) |
| 2 | Faint or poorly defined inner ring |
| 3 | Well-defined thin inner ring, only slightly darker than the back-ground |
| 4 | Well-defined inner ring, thicker than the ring in reference spot No. 3 and somewhat darker than the background |
| 5 | Very dark solid or nearly solid area in the center. The central area is much darker than the background |

3.6.2 การทดสอบคุณสมบัติตาม ISO 8217:2017 Residual marine fuels

การทดสอบเป็นไปตาม ISO 8217:2017 ที่เป็นมาตรฐานของน้ำมันสำหรับเรือขนส่ง มีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 23

ตารางที่ 23 การทดสอบตาม ISO 8217 Residual marine fuels

| No. | Test Item | Unit | Test Method |
|---|---|---|---|
| 1 | API Gravity at 60°F | °API | ASTM D4052-16 |
| 2 | Density at 15°C | kg/m3 | ASTM D4052-16 |
| 3 | Kinematic Viscosity at 50°C | mm2/s | ASTM D455-17a |
| 4 | Sulfur | % wt. | ASTM D6443-14 |
| 5 | Carbon residue | % wt. | ASTM D4530-15 |
| 6 | Flash Point | °C | ASTM D93-16a |
| 7 | Pour point | °C | ASTM D5950-14 |
| 8 | Ash | % wt. | ASTM D482-13 |
| 9 | Water Content | % vol. | ASTM D95-13e1 |
| 10 | Total Acid number | mg KOH/g | ASTM D664-17 |
| 11 | CCAI (Calculate Carbon Aromaticity Index) | - | Calculation |
| 12 | Vanadium | mg/kg | ASTM D 5708-02 (Method A) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | |
|---|---|---|---|
| 13 | Calcium Content | mg/kg | ICP-AES |
| 14 | Zinc Content | mg/kg | ICP-AES |
| 15 | Phosphorus Content | mg/kg | ICP-AES |
| 16 | Silicon Content | mg/kg | ICP-AES |
| 17 | Aluminium Content | mg/kg | ICP-AES |
| 18 | Aluminium plus Silicon | mg/kg | ICP-AES |
| 19 | Used lubricating oils (ULO) | mg/kg | Calculation |

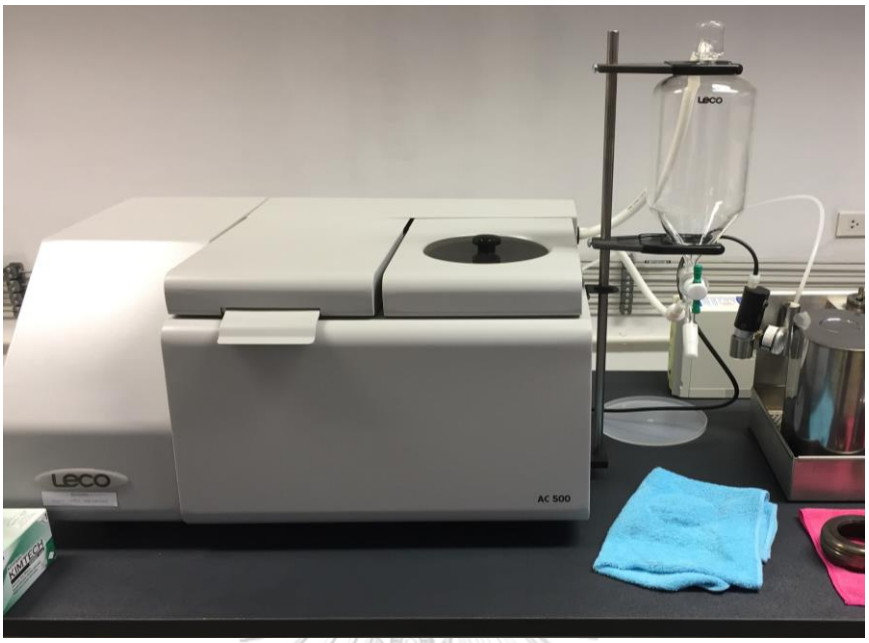
3.6.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ CHN analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN 628S แสดงในรูปที่ 39 ด้วยวิธีการที่เป็นไปตาม ASTM D5373 – 16 และปริมาณของออกซิเจนได้จากการหาปริมาณโดยวิธีผลต่าง (By difference)

รูปที่ 39 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN 628S

3.6.4 ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อนทดสอบโดยเครื่อง Isoperibol Bomb Calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 ดังแสดงในรูปที่ 40 ซึ่งวิธีการทดสอบเป็นไปตาม ASTM D240 – 17 ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันเตา




รูปที่ 40 เครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500

3.6.5 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน ทดสอบโดยเครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น TGA701 ดังรูปที่ 41 ซึ่งวิธีการทดสอบเป็นไปตาม ASTM E1131 – 08(2014) ดังนี้

1) ปรับอุณหภูมิขึ้นทีละ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งถึง 105 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราไหลของไนโตรเจน 500 มิลลิลิตรต่อนาที
2) รักษาอุณหภูมิให้คงที่ 15 นาที (Isothermal)
3) ปรับอุณหภูมิขึ้นทีละ 20 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนกระทั่งถึง 600 องศาเซลเซียส จากนั้นเปลี่ยนแก๊สเป็นออกซิเจนที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที
4) ปรับอุณหภูมิขึ้นทีละ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งถึง 800 องศาเซลเซียส
5) รักษาอุณหภูมิให้คงที่ 40 นาที (Isothermal)

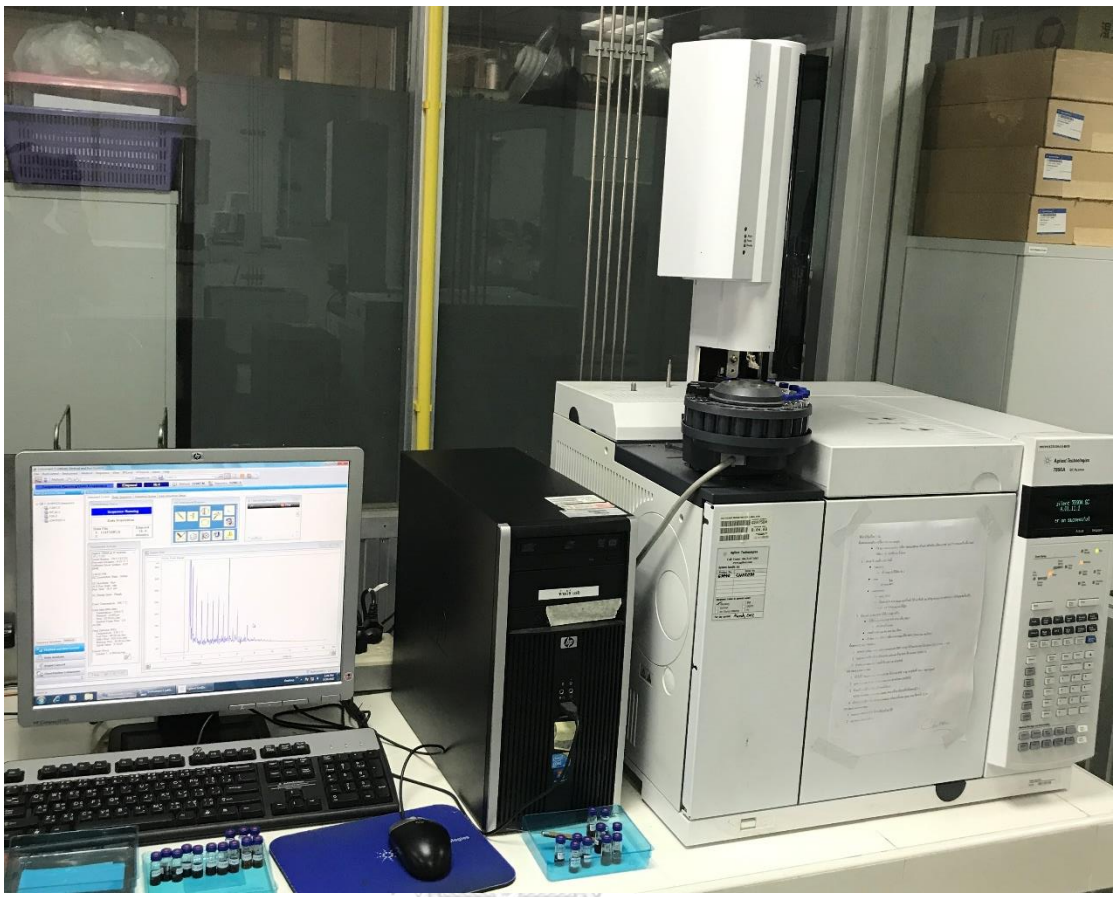
Chulalongkorn University

รูปที่ 41 เครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น TGA701

3.6.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของไฮโดรคาร์บอน (Simulated Distillation by Gas Chromatography, SDGC)

การวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือนของไฮโดรคาร์บอน ทดสอบโดยเครื่อง Gas chromatography ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890A ตามรูปที่ 42 ซึ่งวิธีทดลองเป็นไปตาม ASTM D2887 ผลที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์โดยแบบจำลองซอร์ฟแวร์การกลั่น (Simulated distillation software) ของบริษัท Agilent Technologies สำหรับองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นไปตามคาบจุดเดือดของไฮโดรคาร์บอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 42 เครื่อง Gas chromatography พร้อมซอร์ฟแวร์แบบจำลองการกลั่น ของ Agilent Technologies

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**3.7 การศึกษาต้นทุนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ($C_{ULO}$)**

ต้นทุนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จะทำการศึกษาผู้ผลิตและจำหน่าย ดังนี้

1) บริษัท วังจุฬา ดีเวลลอปเมนท์ (2004) จำกัด
2) บริษัท เอนเนอร์จี อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด
3) บริษัท มหาชัย เอกศิริออยล์ จำกัด

โดยการศึกษาต้นทุนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เป็นต้นทุนที่เกิดจากการซื้อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากศูนย์บริการรถยนต์ที่มีมาตรฐาน และต้นทุนจากการนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพในโรงงานของผู้ผลิตและจำหน่าย ซึ่งกระบวนการการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ส่วนใหญ่ใช้การตกตะกอน และการกรอง เพื่อแยกสารปนเปื้อนและน้ำออกจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว หรือในบางโรงงานอาจจะใช้กระบวนการปั่นเหวี่ยงให้ตกตะกอน หรือการเติมสารละลายเข้าไปเพื่อการ

ปรับปรุงคุณสมบัติ โดยต้นทุนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นต้นทุนที่ได้จากการศึกษาต้นทุนของบริษัทต่างๆ ดังกล่าว

### 3.8 การศึกษาต้นทุนน้ำมันผสมจากน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ($C_{MLB}$)

ต้นทุนการผลิตน้ำมันผสมจากน้ำมันไพไรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในอัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$C_{MLBx} = (x) * C_{MPO} + (1 - x) * C_{ULO}$$

โดย $C_{MLBx}$ คือ ต้นทุนของน้ำมันผสมในอัตราส่วนต่างๆ (บาท/ลิตร)

x คือ % ของน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายในอัตราส่วนต่างๆ (%)

$C_{MPO}$ คือ ต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก (บาท/ลิตร)

$C_{ULO}$ คือ ต้นทุนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (บาท/ลิตร)

### 3.9 การศึกษาการนำนวัตกรรมไปใช้ในเชิงพาณิชย์

ผู้วิจัยจะทำการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) โดยใช้เครื่องมือคือการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) โดยคัดเลือกจากผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key Informants) จากกลุ่มผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholder) ทั้งหมดจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำจาก IMO ในประเทศไทยทั้งหมด ได้แก่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) ผู้ผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ได้แก่ โรงกลั่นปิโตรเลียม (Refineries) มีหัวข้อคำถามปลายเปิดดังนี้
    ก. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำและการปรับตัวของผู้ผลิตและทิศทางในอนาคตเพื่อตอบสนองกับประกาศการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO
    ข. ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO
    ค. ความคิดเห็นในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ในที่นี้ผู้วิจัยจะทำการเลือกองค์กรที่จะสัมภาษณ์แบบเฉพาะเจาะจง โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกให้เป็นโรงกลั่นปิโตรเลียมขนาดใหญ่ที่มีการผลิตน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่ง (IFO 380, 3.5%S) ที่มีกำลังการผลิตมากสุด 3 ราย ในประเทศไทย ได้แก่

1. บริษัท สตาร์ ปิโตรเลียม รีไฟน์นิ่ง จำกัด (มหาชน) (SPRC)
2. บริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) (TOP)
3. บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) (PTTGC)

2) ผู้จำหน่ายน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ได้แก่ เทรดเดอร์ (Traders) มีหัวข้อคำถามปลายเปิด ดังนี้

ก. ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของลูกค้าในปัจจุบัน และปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของลูกค้าเมื่อ IMO ประกาศให้ใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ข. ปัจจัยในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ค. ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

ง. ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ในที่นี้จะทำการเลือกองค์กรที่จะสัมภาษณ์แบบเฉพาะเจาะจง โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกให้เป็นผู้จำหน่ายน้ำมันเตาให้กับเรือขนส่งรายใหญ่ในประเทศไทยจำนวน 3 ราย ที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดรวมกันสูงกว่า 70% ได้แก่

1. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)
2. M PLUS ENERGY Pte Ltd
3. Marine Oil International Ltd

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) ผู้ใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ ได้แก่ เจ้าของเรือขนส่ง (Ship owners) มีหัวข้อคำถามปลายเปิดดังนี้

ก. ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของเจ้าของเรือขนส่งในปัจจุบัน และปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของเจ้าของเรือขนส่งเมื่อ IMO ประกาศให้ใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ข. ปัจจัยในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ค. ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

ง. ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ในที่นี้จะทำการเลือกองค์กรที่จะสัมภาษณ์แบบเฉพาะเจาะจง โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกให้เป็นบริษัทเรือขนส่งรายใหญ่ในประเทศไทยที่มีการดำเนินงานมามากกว่า 10 ปี จำนวน 3 ราย ได้แก่

1. บริษัท ไทยออยล์มารีน จำกัด
2. RCL Feeder Pte Ltd
3. บริษัท พริมา มารีน จำกัด (มหาชน)

4) ผู้ควบคุมกฎระเบียบการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำในประเทศไทยซึ่งมีองค์กรที่กำกับดูแลองค์กรเดียว ได้แก่ สำนักมาตรฐานเรือ กรมเจ้าท่า (Ship Standard Bureau, Marine Department) มีหัวข้อคำถามปลายเปิด ดังนี้

ก. ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

ข. การควบคุมกฎระเบียบดังกล่าวในประเทศไทยจาก IMO

ค. ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำมันทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ง. ความคิดเห็นในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

หัวข้อคำถามปลายเปิดได้ผ่านการตรวจสอบเนื้อหาจากผู้เชี่ยวชาญในวงการเรือขนส่งจำนวน 3 ราย และข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์จะถูกนำมาจัดเป็นหมวดหมู่ โดยผ่านการตรวจสอบสามเส้าด้านข้อมูล (Data Triangulation) จากแหล่งบุคคลทั้ง 4 กลุ่ม และใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบสร้างข้อสรุปจากข้อความเชิงบรรยาย (Descriptive) และเพื่อนำมาสรุปเป็นประเด็นสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 4
# ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 4.1 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

จากกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กจำนวน 5 กิโลกรัม โดยใช้สารตั้งต้นเป็นสาหร่ายแห้งครั้งละ 500 กรัม โดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนสาร 100 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองเฉลี่ยจาการทดลอง 10 ครั้ง เป็นของเหลว 41.37% ของแข็ง 33.97% และแก๊ส 24.66% ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร

| Test No. | Weight of dry microalgae (g) | Yield | | |
|---|---|---|---|---|
| | | % Gas | % Liquid | % Solid |
| RUN1 | 500 | 36.54 | 41.86 | 21.61 |
| RUN2 | 500 | 18.69 | 39.18 | 42.12 |
| RUN3 | 500 | 20.54 | 41.98 | 37.48 |
| RUN4 | 500 | 19.31 | 42.01 | 38.68 |
| RUN5 | 500 | 29.09 | 41.74 | 29.17 |
| RUN6 | 500 | 19.63 | 38.08 | 42.29 |
| RUN7 | 500 | 24.19 | 43.36 | 32.45 |
| RUN8 | 500 | 23.60 | 38.85 | 37.54 |
| RUN9 | 500 | 27.10 | 41.83 | 31.07 |
| RUN10 | 500 | 27.88 | 44.84 | 27.29 |
| Average | | 24.66 | 41.37 | 33.97 |
| Standard Deviation (S.D.) | | 5.63 | 2.09 | 6.78 |

ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ส่วนที่มีลักษณะเป็นน้ำ (Aqueous phase) และส่วนที่มีลักษณะเป็นน้ำมัน (Oil phase) ซึ่งเมื่อปล่อยทิ้งไว้ทั้ง 2 ส่วนจะมีการแยกชั้นกัน และสามารถใช้กรวยแยกสาร แยกทั้ง 2 ส่วนออกมาได้ ดังรูปที่ 43 และ 44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 43 ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในกรวยแยกสาร

รูปที่ 44 ส่วนที่เป็นน้ำมัน (ซ้าย) และส่วนที่เป็นน้ำ (ขวา) ที่ได้จากกรวยแยกสาร

จากการแยก Aqueous phase และ Oil phase ออกมาจากของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าปริมาณของทั้ง 2 ส่วน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ผลของการแยก Aqueous phase และ Oil phase

| Test No. | % Liquid | % Aqueous phase | % Oil phase |
|---|---|---|---|
| RUN1 | 41.86 | 58.22 | 41.78 |
| RUN2 | 39.18 | 52.45 | 47.55 |
| RUN3 | 41.98 | 54.34 | 45.66 |
| RUN4 | 42.01 | 51.14 | 48.86 |
| RUN5 | 41.74 | 50.50 | 49.50 |
| RUN6 | 38.08 | 57.67 | 42.33 |
| RUN7 | 43.36 | 55.54 | 44.46 |
| RUN8 | 38.85 | 54.43 | 45.57 |
| RUN9 | 41.83 | 58.97 | 41.03 |
| RUN10 | 44.84 | 55.85 | 44.15 |
| Average | | 54.91 | 45.09 |
| Standard Deviation (S.D.) | | 2.92 | 2.92 |

เมื่อมีปริมาณของเหลวที่ 41.37% ที่มีส่วนของ Oil phase 45.09% ทำให้สามารถคำนวณผลผลิตที่ได้เป็นน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก ($Y_{MPO}$) เท่ากับ 18.65%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**4.2 การทดสอบการผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับ MPO เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ**

จากการศึกษาและการทดสอบผสมน้ำมัน 5 ประเภท ได้แก่ น้ำมันเตา (FO) น้ำมันทาร์หนัก (Heavy Tar) น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (ULO) กลีเซอรีนดิบ (Crude Glycerin) และน้ำมันยาง (Tire Pyrolysis Oil, TPO) กับ MPO เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ดังรูปที่ 45 ทดสอบด้วยการผสมและศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยการให้คะแนนในช่วง 1-10 คะแนนในแต่ละหัวข้อการศึกษา ได้แก่ การผสมเข้ากันได้ ค่าความร้อน ราคา และความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม สามารถสรุปผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 26

รูปที่ 45 การผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับน้ำมัน MPO

ตารางที่ 26 ผลการศึกษาการผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับ MPO เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

| **ชนิดน้ำมันที่ผสม/หัวข้อการศึกษา** | **FO** | **Heavy Tar** | **ULO** | **Crude Glycerin** | **TPO** |
|---|---|---|---|---|---|
| การผสมเข้ากันได้กับ MPO | 9 | 7 | 8 | 6 | 9 |
| ค่าความร้อน* | 10 | 8 | 9 | 5 | 8.5 |
| ราคา** | 5 | 7 | 6 | 10 | 6 |
| ความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม | 5 | 7 | 10 | 8 | 7 |
| รวม | 29 | 29 | 35 | 29 | 30.5 |

*ค่าความร้อนของ FO, Heavy Tar, ULO, Crude Glycerin, TPO เรียงตามลำดับ ดังนี้: 45.22 MJ/kg, 39.77 MJ/kg, 44.12 MJ/kg, 12.56 MJ/kg และ 42.70 MJ/kg

**ราคาของ FO, Heavy Tar, ULO, Crude Glycerin, TPO เรียงตามลำดับ ดังนี้: 13 บาท/ลิตร, 9 บาท/ลิตร, 8 บาท/ลิตร, 2 บาท/ลิตร และ 10 บาทต่อลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการศึกษาการผสมน้ำมันประเภทต่างๆ กับ MPO พบว่า MPO สามารถผสมได้ดีกับ FO TPO และ ULO โดยมีความหนืดและการไหลเทที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเตา แต่ FO หรือ TPO มีราคาค่อนข้างสูง ส่วนน้ำมันที่มีราคาถูก เช่น Crude Glycerin หรือ Heavy Tar เป็นประเภทของเสียจากโรงผลิตไบโอดีเซลหรือโรงปิโตรเคมี มีปัญหาเรื่องค่าความร้อนต่ำ หรือการที่ไม่เข้ากันกับ MPO เมื่อพิจารณาความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม พบว่า ULO มีความเหมาะสมในการนำมาผสมเพื่อสร้างนวัตกรรมมากที่สุด เนื่องจากเป็นขยะอันตราย มีการสนับสนุนให้นำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทยผ่านกระบวนการผสมเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง (Fuel blending) โดยนโยบายของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม หรือนโยบายในประเทศต่างๆ ในโลกที่สนับสนุนให้นำ ULO กลับมาใช้ใหม่เช่นกัน เมื่อสรุปผลการศึกษารวมแล้ว พบว่าน้ำมัน ULO มีความเหมาะสมที่จะนำมาผสมกับ MPO เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำมากที่สุด

### 4.3 การผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

4.3.1 น้ำหนักและปริมาตรของน้ำมัน MLB

จากการผสมน้ำมันทั้ง 2 ประเภทในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 ระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วตามลำดับ โดยมีชื่อเรียกในงานวิจัยนี้ว่า MLB100, MLB80, MLB50, MLB20, MLB0 ซึ่งปริมาตรรวมของน้ำมันผสมแต่ละครั้งเท่ากับ 250 มิลลิลิตร สามารถสรุปน้ำหนักและปริมาตรของน้ำมันผสมทุกอัตราส่วนได้ดังตารางที่ 27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

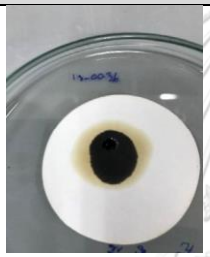
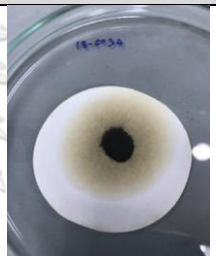
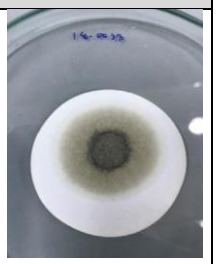
ตารางที่ 27 สรุปน้ำหนัก ปริมาตรของน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ในแต่ละอัตราส่วน

| Blend Name | Blend Weight (g) | MPO | | | | ULO | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Vol (ml) | Weight (g) | %wt. | %vol. | Vol (ml) | Weight (g) |
| MLB100 | 256.97 | 250.00 | 256.97 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 |
| MLB80 | 240.18 | 200.00 | 202.02 | 84.11 | 80.00 | 50.00 | 38.16 |
| MLB50 | 229.79 | 125.00 | 126.02 | 54.84 | 50.00 | 125.00 | 103.77 |
| MLB20 | 218.01 | 50.00 | 49.83 | 22.85 | 20.00 | 200.00 | 168.18 |
| MLB0 | 212.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 250.00 | 212.17 |

เนื่องจากน้ำมันทั้ง 2 ชนิดมีขั้วเดียวกัน (Same polarity) ทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ดี โดยจากการสังเกต ไม่พบการแยกชั้นของน้ำมันทั้ง 2 ชนิดแม้ว่าจะเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน

4.3.2 การทดสอบการเข้ากันของน้ำมัน MLB ผ่าน Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test

จากผลการทดสอบ พบว่าน้ำมันทั้ง 2 ชนิดมีความเข้ากันได้อยู่ในระดับปานกลาง ดังแสดงในรูปที่ 46 โดยน้ำมันที่ผสมได้อาจจะเกิดกากตะกอนในบางส่วนซึ่งเกิดจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ทำให้ผลการทดสอบความเข้ากันได้ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

| MLB100 | MLB80 | MLB50 | MLB20 | MLB0 |
|---|---|---|---|---|
| |  | |  |  |
| Rating 1: Compatible | Rating 5: Unstable | Rating 5: Unstable | Rating 4: Unstable | Rating 3: Increased sludge potential |

รูปที่ 46 ผลการทดสอบ Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมัน MLB ตามการทดสอบของ ISO 8217 Residual marine fuels**

ตารางสรุปผลการทดสอบน้ำมัน MLB ตามรายการทดสอบของ ISO 8217 แสดงดังในตารางที่ 28 โดยในตารางแสดงขีดจำกัด (Limit) ของรายการทดสอบต่างๆ ที่เป็นไปตามน้ำมัน Residual marine fuel ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ชนิด RMG180 โดยผู้วิจัยแสดงสีของข้อมูลในตาราง ดังนี้

สีเขียว หมายถึง ค่าที่ได้ ผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 RMG180

สีส้ม หมายถึง ค่าที่ได้ ไม่ผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 RMG180

ผลการทดสอบโดยส่วนใหญ่เป็นไปตามค่าคุณสมบัติที่ได้ของน้ำมันทั้ง 2 ชนิด แต่อาจจะมีบางรายการที่มีค่าที่ได้ไม่เป็นไปตามกฎของการผสมกัน เนื่องจากอาจจะเกิดจากกากตะกอนที่อยู่ในน้ำมันผสมทั้งสอง ส่วนค่าคุณสมบัติโดยส่วนตัวของน้ำมันทั้ง MPO และ ULO เป็นไปตามข้อมูลของวรรณกรรมที่ได้ศึกษามา

ตารางที่ 28 สรุปคุณสมบัติของน้ำมัน MLB ตามการทดสอบของ ISO 8217 Residual marine fuels

| No. | Test Item | Unit | Test Method | Limit ISO 8217 | MLB100 | MLB80 | MLB50 | MLB20 | MLB0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | API Gravity at 60°F | °API | ASTM D4052-16 | - | 0.7 | 2.7 | 13.8 | 23.8 | 27.6 |
| 2 | Density at 15°C | kg/m$^3$ | ASTM D4052-16 | Max. 991.0 | 1069.6 | 1055.2 | 973.8 | 910.9 | 888.8 |
| 3 | Kinematic Viscosity at 50°C | Mm$^2$/s | ASTM D455-17a | Max. 180 | 99.01 | 153.2 | 280.2 | 87.26 | 55.24 |
| 4 | Sulfur | % wt. | ASTM D6443-14 | Max. 0.5 | 0.313 | 0.374 | 0.4 | 0.461 | 0.8 |
| 5 | Carbon residue | % wt. | ASTM D4530-15 | Max. 18.00 | 9.65 | 8.59 | 4.89 | 3.14 | 1.43 |
| 6 | Flash Point | °C | ASTM D93-16a | Min. 60 | 54.5 | 64 | 69 | 81.5 | 136 |
| 7 | Pour point | °C | ASTM D5950-14 | Max. 30 | -6 | -24 | -36 | -45 | -33 |
| 8 | Ash | % wt. | ASTM D482-13 | Max. 0.1 | 0.017 | 0.115 | 0.32 | 0.515 | 0.707 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | Water Content | % vol. | ASTM D95-13e1 | Max. 0.5 | 15.4 | 12.4 | 7.75 | 4.1 | 0.6 |
| 10 | Total Acid number | mg KOH/g | ASTM D664-17 | Max. 2.5 | 29.31 | 18.75 | 12.39 | 5.4 | 0.9 |
| 11 | Calculate Carbon Aromaticity Index (CCAI) | - | Calculation | Max. 870 | 946 | 926 | 838 | 789 | 774 |
| 12 | Vanadium | mg/kg | ASTM D 5708-02 (Method A) | Max. 350 | 0.1 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.5 |
| 13 | Sodium | mg/kg | ICP-AES | Max. 100 | 8.3 | 9.5 | 16.9 | 17.5 | 26.6 |
| 14 | Calcium Content | mg/kg | ICP-AES | - | 1.6 | 187.8 | 1244.5 | 1225.0 | 1937.0 |
| 15 | Zinc Content | mg/kg | ICP-AES | - | 3.4 | 21.9 | 141.6 | 160.1 | 465.6 |
| 16 | Phosphorus Content | mg/kg | ICP-AES | - | 3.1 | 90.4 | 263.9 | 346.8 | 525.0 |
| 17 | Silicon Content | mg/kg | ICP-AES | - | 0.9 | 5.9 | 9.0 | 12.30 | 14.1 |
| 18 | Aluminium Content | mg/kg | ICP-AES | - | 4.7 | 5.7 | 7.4 | 8.70 | 9.8 |
| 19 | Aluminium plus Silicon | mg/kg | ICP-AES | Max. 60 | 5.6 | 11.6 | 16.4 | 19.70 | 23.9 |

จากตารางพบว่า MLB20 เป็นสัดส่วนผสมน้ำมันทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 เกือบทั้งหมด ยกเว้น Ash, Water content, Total acid number ซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ผลิตน้ำมัน LSFO ถ้าหากสามารถแก้ไขคุณสมบัติทั้ง 3 ตัวให้ผ่านเกณฑ์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิ
CHULALONGKORN U

**4.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content)**

จากการผลทดสอบ พบว่าปริมาณกำมะถันใน MPO ค่อนข้างต่ำ และมีค่าต่ำกว่า 0.5% ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำมาผสมเพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำตามประกาศของ IMO ซึ่งแม้ว่า ULO จะมีค่ากำมะถันเกิน 0.5% เนื่องจากผลิตมาจากน้ำมันดิบ แต่น้ำมันผสมทุกๆ อัตราส่วนของ MPO และ ULO มีค่ากำมะถันต่ำกว่า 0.5% ทั้งหมด ความน่าสนใจของการผสมน้ำมันทั้ง 2 ชนิดคือ เมื่อผสมน้ำมัน MPO ในปริมาณเพียง 20% สามารถลดกำมะถันของน้ำมัน ULO จาก 0.8% เหลือเพียง 0.461%

**4.6 ปริมาณขี้เถ้า (Ash content)**

เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของโลหะหนัก ไม่ว่าจะมาจากธรรมชาติของน้ำมันดิบ เช่น วานาเดียม โซเดียม แคลเซียมและนิกเกิล หรือมาจากแหล่งที่มาอื่นๆ เช่น โซเดียม อลูมิเนียม ซิลิกอน โพแทสเซียมและเหล็ก จะทำให้เกิดขี้เถ้าซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งของออกไซด์ ซัลเฟตหรือสารประกอบที่ซับซ้อนหลังจากการเผาไหม้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นขณะหนึ่ง ขี้เถ้าจะกลายเป็นโคลนเกาะติดและสร้างความเสียหายให้กับชิ้นส่วนในระบบเผาไหม้ เรียกว่า การกัดกร่อนแบบร้อน (Hot corrosion) ซึ่ง ULO เป็นน้ำมันที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักเนื่องจากประกอบไปด้วยธรรมชาติของน้ำมันดิบ และสารปรุงแต่ง (Additives) ซึ่งมีทั้งสารซักฟอก (Detergent) ที่มาจากแคลเซียมเป็นหลักและสารป้องกันการสึกหรอ (Anti-wear) ที่เป็นสารประกอบของเหล็กและฟอสฟอรัส ทำให้ ULO มีค่าปริมาณขี้เถ้าสูง และปริมาณของ ULO ใน MLB มีส่วนสำคัญในการทำให้ค่าขี้เถ้าสูงด้วย ซึ่งปริมาณขี้เถ้าของน้ำมัน MLB ทั้งหมดไม่ผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 ยกเว้น MLB100 ที่เป็น MPO อย่างเดียว ดังนั้น การพิจารณาลดปริมาณขี้เถ้าของ ULO ก่อนนำมาผสมอาจทำได้โดย solvent extraction และ agitated thin film evaporation (Manyuchi & Nengiwa, 2015) ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบทำให้ราคาของ ULO สูงขึ้นเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาศึกษาต่อไป

**4.7 ปริมาณน้ำ (Water content)**

ไม่มีน้ำมันผสม MLB ใด ผ่านเกณฑ์ปริมาณน้ำของ ISO 8217 ที่ 0.5% ได้เลย ซึ่งปริมาณน้ำที่สูงเกิดจาก MPO ซึ่งมีปริมาณน้ำค่อนข้างสูง (15.4%) ซึ่งเป็นไปตามที่ได้ศึกษาจากวรรณกรรม การปรับปรุงคุณภาพของ MPO ก่อนนำมาผสมเป็นสิ่งที่ควรพิจารณา ด้วยเทคนิคการลดปริมาณน้ำจากน้ำมันต่างๆ เช่น hydrogel adsorbents (Fregolente, Wolf Maciel, & Oliveira, 2015) หรือ

azeotropic water removal โดยใช้ n-butanol และ 2-methylfuran (Lu, Guo, Fu, & Chang, 2017)

**4.8 ความเป็นกรด (Acidity)**

ได้มีการศึกษามาแล้วว่าน้ำมันไพโรไลซิสเป็นน้ำมันที่มีความเป็นกรดและกัดกร่อนสูง ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความเป็นกรดสูงจะทำให้เกิดความเสียหายให้กับอุปกรณ์ฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลของเรือขนส่ง จากเกณฑ์ของ ISO 8217 ที่ให้ค่าความเป็นกรดไม่เกิน 2.5 mg KOH/g พบว่ามีเพียง MLB0 ที่เป็น ULO อย่างเดียวที่ผ่านเกณฑ์ การลดความเป็นกรดในน้ำมัน MPO อาจทำได้โดยการกลั่นแบบมีปฏิกิริยา (Reactive distillation) ด้วยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล และเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดซัลฟิวริค (Wisniewski Jr et al., 2015) หรือการผสมกับ Alkaline rich ash materials เช่น เปลือกเมล็ดโกโก้ (Cacoa Husk) เปลือกมันสำปะหลัง (Cassava Peel) ที่สามารถลดปริมาณกรดในน้ำมันได้ (Donkor et al., 2016) อย่างไรก็ดี ISO 8217 แสดงไว้ว่าเชื้อเพลิงที่มาจากน้ำมันดิบแนฟทานิค สามารถมีค่าความเป็นกรดสูงกว่าเกณฑ์และสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ซื้อและผู้ขายในการตกลงค่าความเป็นกรดที่ยอมรับได้ทั้ง 2 ฝ่าย

**4.9 Calculate Carbon Aromaticity Index (CCAI)**

CCAI เป็นตัววัดความสามารถในการจุดติดไฟของน้ำมันเตาซึ่งคำนวณมาจากค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดตามรายละเอียดใน ISO 8217 โดย CCAI ที่มีค่าต่ำ น้ำมันจะมีความสามารถในการจุดติดไฟสูงกว่า อย่างไรก็ดีอาจจะพบว่าน้ำมันที่มีค่า CCAI เท่ากัน อาจจะมีความสามารถในการจุดติดไฟต่างกัน ซึ่งวิธีการทดสอบ FIA-100FCA ที่ใช้ปริมาตรคงที่ในห้องเผาไหม้ (Constant volume combustion chamber, CVCC) จะเป็นการทดสอบเพิ่มเติมที่ได้รับการแนะนำจาก ISO 8217 จากผลการทดสอบ พบว่าการเพิ่มปริมาณ ULO ใน MLB จะทำให้ค่า CCAI ต่ำลงซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการจุดติดไฟของ MLB โดยการเพิ่มปริมาณ ULO ตั้งแต่ 50% ใน MLB จะทำให้น้ำมันผสมผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217

**4.10 Used Lubricating Oil: Calcium and zinc or Calcium and phosphorus**

การผสม ULO ในน้ำมันเตาที่ใช้กับเรือขนส่ง ถ้าหากไม่มีกฎเกณฑ์หรือไม่มีการควบคุมในด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว สามารถเป็นแนวทางในการนำขยะอันตรายมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้ ซึ่ง ISO 8217 ได้กำหนดว่า น้ำมันเตาที่ใช้ในเรือขนส่งสามารถที่จะมีน้ำมัน ULO ผสมอยู่ได้ ถ้าหากธาตุทั้ง 2

กลุ่ม ได้แก่ แคลเซียมและสังกะสี (Calcium and zinc) หรือ แคลเซียมและฟอสฟอรัส (Calcium and phosphorus) มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้

แคลเซียม > 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสังกะสี > 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

แคลเซียม > 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และฟอสฟอรัส > 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการผสม ULO ใน MLB แล้ว จะทำให้น้ำมันผสมผ่านข้อกำหนดนี้ทั้งหมด

### 4.11 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคองค์ประกอบแบบแยกธาตุของ MLB แสดงให้เห็นในตารางที่ 29 โดย ULO มีองค์ประกอบของคาร์บอนค่อนข้างสูง ในขณะที่ MPO เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนและไนโตรเจนสูง ในขณะที่องค์ประกอบธาตุที่ได้ของน้ำมันผสมในอัตราส่วนอื่นๆ มีค่าเป็นไปตามสัดส่วนของการผสมน้ำมัน

ตารางที่ 29 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนและก๊าซอื่นๆ ของ MLB จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

| Blend | Carbon (%wt.) | Hydrogen (%wt.) | Nitrogen (%wt.) | Oxygen and minor gases |
|---|---|---|---|---|
| MLB100 | 57.03 | 8.77 | 9.99 | 24.21 |
| MLB80 | 67.76 | 10.62 | 6.57 | 15.05 |
| MLB50 | 73.22 | 11.03 | 4.31 | 11.44 |
| MLB20 | 76.29 | 11.89 | 2.03 | 9.78 |
| MLB0 | 82.77 | 12.73 | 0.07 | 4.44 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 4.12 ค่าความร้อน (Heating Value)

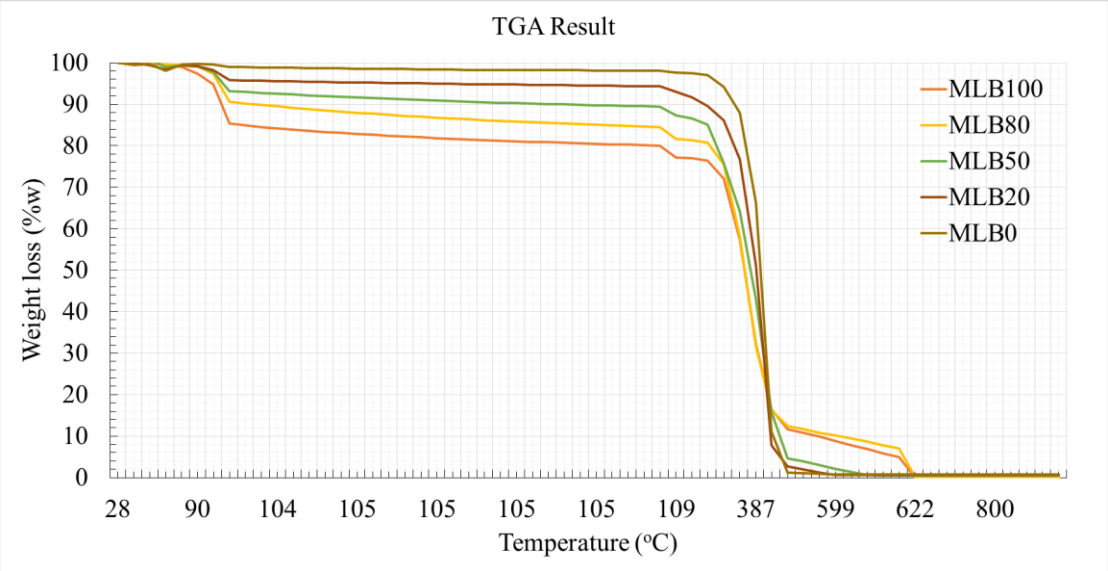
ค่าความร้อนของน้ำมัน MLB สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 30 โดยค่าความร้อนของ MLB0 หรือ ULO เทียบเท่ากับค่าความร้อนของน้ำมันเตา (45.22 MJ/kg) ในขณะที่ MPO มีค่าความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากมีส่วนประกอบเป็นออกซิเจนและความชื้นสูง การเพิ่มสัดส่วนของ ULO ทำให้ค่าความร้อนของ MLB ดีขึ้น

ตารางที่ 30 ค่าความร้อนของ MLB

| Blend | Weight (g) | Heating Value (MJ/kg) |
|---|---|---|
| MLB100 | 0.1894 | 27.29 |
| MLB80 | 0.1807 | 33.24 |
| MLB50 | 0.1897 | 37.44 |
| MLB20 | 0.1805 | 39.93 |
| MLB0 | 0.1805 | 44.12 |

**4.13 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)**

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของน้ำมันผสม MLB แสดงให้เห็นในรูปที่ 47 โดย ULO สลายตัวอย่างช้าๆ จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่ MPO สลายตัวเร็วกว่าเนื่องจากประกอบไปด้วยสารระเหย (Volatiles) และการสลายตัวของของทุกผลิตภัณฑ์จะสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 622 องศาเซลเซียส




รูปที่ 47 TGA Profile ของน้ำมันผสม MLB

จากกราฟพบว่า การสลายตัวทางความร้อนแบ่งออกเป็น 4 ช่วง

1) Highly volatile matter (อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส)
2) Medium volatile matter (อุณหภูมิในช่วง 200-600 องศาเซลเซียส)

3) Combustible material (อุณหภูมิในช่วง 600-650 องศาเซลเสียส)

4) Ash (อุณหภูมิสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส)

พบว่า ULO ส่วนใหญ่เป็นสาร Medium volatile (97%) ในขณะที่ MPO 30% เป็น Highly volatile และ 65% เป็น Medium volatile จึงทำให้การสลายตัวเร็วกว่า ส่วนน้ำมันผสม MLB มีผลการสลายตัวทางความร้อนอยู่ในช่วงของทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์

**4.14 การวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของไฮโดรคาร์บอน (Simulated Distillation by Gas Chromatography, SDGC)**

ผลจากโปรแกรม Simulated distillation จากเครื่อง Gas chromatography แสดงให้เห็นในตารางที่ 31 โดย MPO มีองค์ประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนที่เบาระหว่าง $C_5$-$C_{15}$ ค่อนข้างสูง (18%) ในขณะที่ ULO มีเพียง 14% และที่เหลือเป็นน้ำมันดีเซลและน้ำมันหนัก หลังจากการผสม พบว่าการผสมทำให้น้ำมันที่ได้มีองค์ประกอบที่มีทิศทางเป็นน้ำมันหนักมากกว่า

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมัน MLB ตามคาบจุดเดือดไฮโดรคาร์บอน

| Blend | Boiling Point (°C) | Hydrocarbon Composition | % Weight |
|---|---|---|---|
| MLB100 | IBP-200 | Naphtha ($C_5$-$C_{12}$) | 8.75 |
| | 200-250 | Kerosene ($C_{12}$-$C_{15}$) | 9.25 |
| | 250-370 | Diesel ($C_{15}$-$C_{33}$) | 27.75 |
| | 370-FBP | Heavy Oils (>$C_{33}$) | 53.25 |
| MLB80 | IBP-200 | Naphtha ($C_5$-$C_{12}$) | 6.64 |
| | 200-250 | Kerosene ($C_{12}$-$C_{15}$) | 6.86 |
| | 250-370 | Diesel ($C_{15}$-$C_{33}$) | 19.80 |
| | 370-FBP | Heavy Oils (>$C_{33}$) | 65.70 |
| MLB50 | IBP-200 | Naphtha ($C_5$-$C_{12}$) | 6.50 |
| | 200-250 | Kerosene ($C_{12}$-$C_{15}$) | 7.14 |
| | 250-370 | Diesel ($C_{15}$-$C_{33}$) | 19.46 |
| | 370-FBP | Heavy Oils (>$C_{33}$) | 65.90 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | |
|---|---|---|---|
| MLB20 | IBP-200 | Naphtha ($C_5$-$C_{12}$) | 6.64 |
| | 200-250 | Kerosene ($C_{12}$-$C_{15}$) | 7.15 |
| | 250-370 | Diesel ($C_{15}$-$C_{33}$) | 18.51 |
| | 370-FBP | Heavy Oils (>$C_{33}$) | 66.70 |
| MLB0 | IBP-200 | Naphtha ($C_5$-$C_{12}$) | 6.64 |
| | 200-250 | Kerosene ($C_{12}$-$C_{15}$) | 7.15 |
| | 250-370 | Diesel ($C_{15}$-$C_{33}$) | 18.23 |
| | 370-FBP | Heavy Oils (>$C_{33}$) | 66.98 |

**4.15 การศึกษาต้นทุนของ MPO ($C_{MPO}$)**

4.15.1 ต้นทุนของสาหร่ายแห้งแบบผง ($C_{DM}$)

ต้นทุนของสาหร่ายแห้งแบบผง จากการเก็บข้อมูลของผู้ประกอบการฟาร์มสาหร่ายนาทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยเป็นต้นทุนทางตรง ได้แก่ ค่าวัตถุดิบทางตรง ค่าแรงงานทางตรง และค่าใช้จ่ายในการผลิตทางตรง สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ต้นทุนการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง

| **สารอาหาร** | **ปริมาณสารอาหาร (กิโลกรัม/น้ำ 20,000 ลิตร )** | **ราคา(บาท/กิโลกรัม)** | **รวมต้นทุน (บาท/น้ำ 20,000 ลิตร)** |
|---|---|---|---|
| $NaHCO_3$ | 36 | 18 | 648.00 |
| $NaNO_3$ | 9 | 48 | 432.00 |
| $MgSO_4$ | 10 | 12 | 120.00 |
| NaCl | 10 | 6 | 60.00 |
| N:P:K | 6 | 20 | 120.00 |
| รวมต้นทุนค่าสารอาหาร (บาท/น้ำ 20,000 ลิตร) ($C_N$) | | | 1,380.00 |
| ค่าน้ำ (บาท/น้ำ 20,000 ลิตร) ($C_W$) | | | 133.20 |
| ค่าไฟ (บาท/น้ำ 20,000 ลิตร) ($C_E$) | | | 130.00 |
| ค่าแรงทางตรง (บาท/น้ำ 20,000 ลิตร) ($C_L$) | | | 100.00 |
| รวม (บาท/น้ำ 20,000 ลิตร หรือ 10 kg สาหร่ายแห้งแบบผง) | | | 1,743.20 |
| ต้นทุนรวม (บาท/1 kg สาหร่ายแห้งแบบผง) ($C_{DM}$) | | | 174.32 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางสรุปว่าต้นทุนรวมของสาหร่ายแห้งแบบผงเท่ากับ 174.32 บาทต่อกิโลกรัม มีรายละเอียดประกอบแต่ละต้นทุน ดังนี้

1) ค่าสารอาหาร ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าแรง คิดต่อปริมาณน้ำ 20,000 ลิตร (ฟาร์มนาทองใช้บ่อขนาด 20,000 ลิตร จำนวน 6 บ่อ)
2) ค่าสารอาหารที่ประกอบไปด้วย $NaHCO_3$, $NaNO_3$, $MgSO_4$, NaCl และ N:P:K เป็นราคาสารเคมีขนาดกระสอบ 25 กิโลกรัม
3) ฟาร์มนาทองใช้การเลี้ยงแบบต่อเนื่องคือ เก็บเกี่ยวสาหร่ายเพียง 60% และให้อีก 40% ขยายพันธุ์ต่อไป จะลดค่าสารอาหารและค่าน้ำได้
4) ฟาร์มนี้ใช้สารอาหารสูตรซาร์รุคแบบดัดแปลง (Modified Zarrouk's medium)
5) การเลี้ยงสาหร่ายที่ฟาร์มนาทองได้ผลผลิตเฉลี่ย 0.05% โดยน้ำหนัก ในน้ำ 1 ลิตร มีสาหร่าย 0.5 กรัม และในน้ำสาหร่าย 20,000 ลิตร จะมีสาหร่ายแห้ง 10 กิโลกรัม
6) ค่าน้ำคิดจากอัตราค่าน้ำต่อหน่วยของการประปานครหลวงสำหรับธุรกิจ ราชการ รัฐวิสาหกิจ อุตสาหกรรม และอื่นๆ เท่ากับ 11.10 บาทต่อลูกบาศก์เมตร
7) ค่าไฟประกอบด้วยค่าอบแห้งผ่านเครื่องอบแห้งด้วยความร้อน 8-12 ชั่วโมงที่ 70 องศาเซลเซียส (ในช่วงฤดูร้อนค่าไฟอาจลดลงเนื่องจากสามารถนำสาหร่ายไปตากแห้งด้วยแสงแดดได้) และค่าบดด้วยเครื่องบดให้ได้ขนาด 0.25 มิลลิเมตร
8) อัตราค่าไฟคิดจากอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงสำหรับกิจการขนาดเล็กมีแรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์ เท่ากับ 3.2484 บาทต่อหน่วย
9) ค่าแรงทางตรงของพนักงานดูแลบ่อสาหร่ายต่อวันเท่ากับ 300 บาท มีจำนวน 1 คน โดยทำหน้าที่เติมสารอาหาร บำรุงรักษา เก็บเกี่ยว ทำแห้ง และบดเป็นผง โดยปกติ 1 วันเก็บเกี่ยวน้ำสาหร่ายได้ทั้งหมด 60,000 ลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับราคาจำหน่ายสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผงในประเทศไทย พบว่าราคาจำหน่ายสาหร่ายแห้งแบบผงจากฟาร์มมีราคาอยู่ในช่วง 400 ถึง 2,200 บาทต่อกิโลกรัม เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถนำไปใช้ในการทำอาหารเสริมให้กับมนุษย์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ราคาจำหน่ายสาหร่ายสไปรูลิน่าแบบผงในประเทศไทย

| ฟาร์ม | จังหวัด | ราคา (บาท/กิโลกรัม) |
|---|---|---|
| บุญสมฟาร์ม | เชียงใหม่ | 500 |
| ฟาร์มนาทอง | ฉะเชิงเทรา | 400 |
| ฟาร์ม EnerGaia | กรุงเทพฯ | 2,200 |

4.15.2 ต้นทุนการไพโรไลซิส ($C_P$)

ต้นทุนการไพโรไลซิส คำนวณจากการทดลองการไพโรไลซิสผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร พบว่าต้นทุนประกอบไปด้วยค่าไฟจากเครื่องปฏิกรณ์และค่าแรงดำเนินการ แสดงดังในตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายแห้งแบบผง 1 กิโลกรัม ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร
(อุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 3.3: แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร)

| อุปกรณ์ | แรงดัน (V) | กำลัง (kW) | ระยะเวลา (Hour) | หน่วยไฟฟ้า (kW.hr) |
|---|---|---|---|---|
| Motor No.2 | 220 | 1.8 | 0.5 | 0.9 |
| Motor No.4 | 230 | 0.75 | 0.5 | 0.375 |
| Motor No.9 | 220 | 0.68 | 0.5 | 0.34 |
| Heater No.5 | 220 | 3.78 | 0.5 | 1.89 |
| Cooling No.7 | 220 | 0.99 | 0.5 | 0.495 |
| รวมหน่วยไฟฟ้า (หน่วย) | | | | 4.00 |
| ค่าไฟ (บาท/หน่วย) | | | | 3.2484 |
| ต้นทุนค่าไฟของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง) ($C_{EP}$) | | | | 12.99 |
| ต้นทุนค่าแรงดำเนินการ (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง) ($C_{LP}$) | | | | 7.50 |
| ต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิส (บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง) ($C_P$) | | | | 20.49 |

จากตารางสรุปว่าต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิสเท่ากับ 20.49 บาทต่อกิโลกรัมสาหร่ายแห้ง มีรายละเอียดประกอบแต่ละต้นทุน ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) อัตราค่าไฟคิดจากอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงสำหรับกิจการขนาดเล็กมีแรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์ เท่ากับ 3.2484 บาทต่อหน่วย
2) ค่าแรงของพนักงานต่อวันเท่ากับ 300 บาท มีจำนวน 1 คน โดยใช้ระยะเวลาการเดินเครื่อง 1 ชั่วโมงได้ 5 กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง

โดยในการทดลองไพโรไลซิสนี้เป็นกระบวนการในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กจะใช้ไฟฟ้าเป็นตัวสร้างความร้อนเป็นหลักในเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้ต้นทุนไพโรไลซิสค่อนข้างสูง ถ้าหากเป็นเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จะใช้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการเป็นตัวสร้างความร้อนซึ่งจะทำให้ต้นทุนไพโรไลซิสต่ำกว่าค่อนข้างมาก นอกจากนี้ ค่าแรงยังเป็นค่าแรงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ ทำให้ต้นทุนค่าแรงต่อหน่วยค่อนข้างสูง

โดยสรุปจากข้อ 4.1, 4.15.1 และ 4.15.2 สามารถคำนวณต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กได้จากสมการในข้อ 3.3 ดังนี้

$$C_{MPO} = (C_{DM} + C_P)/Y_{MPO}$$

$$C_{MPO} = (174.32 + 20.49)/18.65\%$$

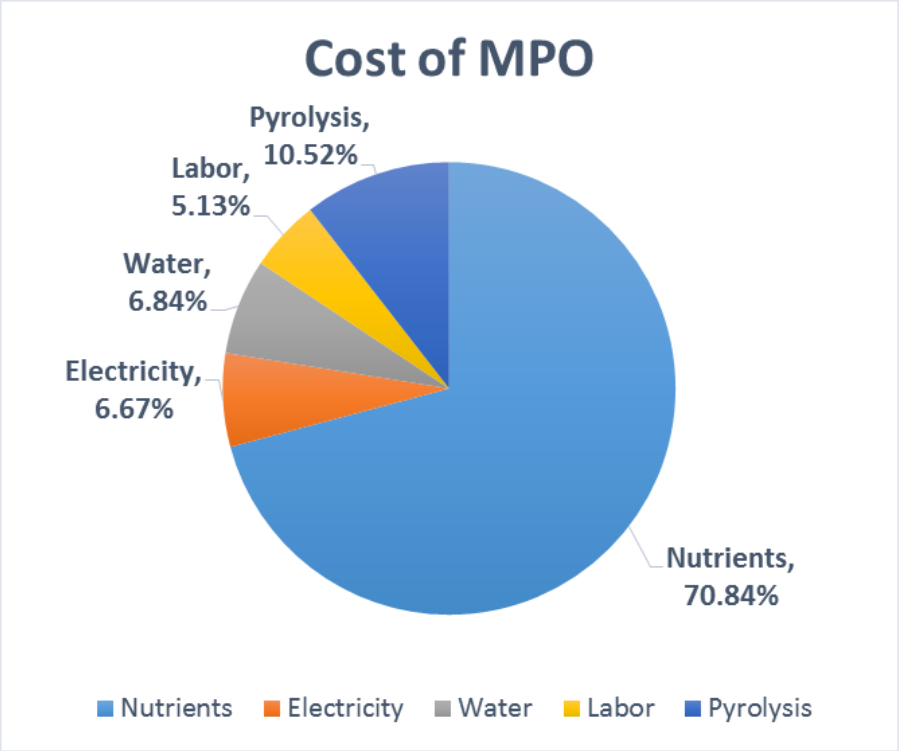
$$C_{MPO} = 1{,}044.56 \text{ บาท}/\text{กิโลกรัม}$$

ซึ่งเมื่อคำนวณโดยใช้ค่าความหนาแน่นของ MPO ที่ได้จากตารางที่ 4.5 (1,069.6 kg/$m^3$) จะได้ ต้นทุน MPO ($C_{MPO}$) เท่ากับ 976.59 บาท/ลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.15.3 สัดส่วนต้นทุนของ MPO

จากต้นทุนทั้งหมดของ MPO สามารถสรุปแยกส่วนเป็นแผนภาพดังรูปที่ 48 โดยพบว่าต้นทุนหลักของ MPO คือต้นทุนสารอาหารซึ่งมีค่าสูงถึง 70.84%




รูปที่ 48 ต้นทุนของ MPO แยกตามประเภทของต้นทุน

**4.16 การศึกษาต้นทุนของ ULO ($C_{ULO}$)**

จากการเก็บข้อมูลจากทั้ง 3 บริษัท พบว่าราคารับซื้อน้ำมัน ULO จากศูนย์บริการรถยนต์ที่มีมาตรฐานเกิดจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ ราคาน้ำมันเตาในประเทศ และอุปสงค์และอุปทานของ ULO ในประเทศ ซึ่งโดยปกติราคารับซื้อ ULO จากศูนย์ฯ อยู่ในช่วงราคาต่ำกว่าราคาน้ำมันเตาในประเทศประมาณ 5 บาท ซึ่งระดับราคารับซื้ออยู่ในช่วงราคา 7-13 บาท/ลิตร โดยราคารับซื้อ ULO ในปัจจุบัน (เมษายน 2561) อยู่ที่ 8 บาท/ลิตร

ส่วนราคาค่าปรับปรุงคุณภาพอยู่ในช่วง 0.20-0.40 บาท/ลิตร โดยทั้ง 3 บริษัท ใช้กระบวนการการตกตะกอน และการกรอง เพื่อแยกสารปนเปื้อนและน้ำออกจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำที่สุด

โดยสรุป ราคาต้นทุนของ ULO ($C_{ULO}$) ที่ใช้ในการศึกษานี้ จะใช้ราคาในปัจจุบันคือ 8.30 บาท/ลิตร จากราคารับซื้อ ULO จากศูนย์ฯ 8.00 บาท/ลิตร และค่าปรับปรุงคุณภาพเฉลี่ย 0.30 บาท/ลิตร

**4.17 การศึกษาต้นทุนของ MLB ($C_{MLB}$)**

จากการคำนวณตามสมการในข้อที่ 3.8 สามารถสรุปต้นทุนของ MLB ในสัดส่วนการผสมต่างๆ ได้ตามตารางที่ 35

ตารางที่ 35 การคำนวณต้นทุน MLB ตามสัดส่วนการผสมต่างๆ

| อัตราส่วน MLB | ราคาต้นทุน (บาท/ลิตร) |
|---|---|
| MLB100 | 976.59 |
| MLB80 | 782.93 |
| MLB50 | 492.45 |
| MLB20 | 201.96 |
| MLB0 | 8.30 |

เนื่องจาก MLB20 เป็นน้ำมันที่มีคุณสมบัติที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมัน LSFO มากที่สุดจากตารางที่ 28 ซึ่งได้ต้นทุนการผลิต MLB20 เท่ากับ 201.96 บาท/ลิตร ซึ่งยังสูงกว่าราคาน้ำมัน LSFO ในตลาดที่ 26.94 บาท/ลิตร อยู่ถึง 175.02 บาท/ลิตร (S&P Global Platts, 2018)

แม้ว่าในปัจจุบันราคาต้นทุนของ MLB20 ยังไม่สามารถแข่งขันได้จริง แต่ถ้าหากในอีก 50-100 ปีข้างหน้า ถ้าหากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณน้อยไปจากโลกเรื่อยๆ ทำให้ราคาน้ำมันดิบพุ่งสูงขึ้น อาจจะทำให้ราคาต้นทุนของ MLB20 สามารถแข่งขันได้ แต่ถ้าหากพิจารณาถึงปัจจุบัน ความพยายามในการลดต้นทุนของ MPO เป็นสิ่งที่สำคัญที่จะทำให้น้ำมัน MLB สามารถแข่งขันได้ในตลาด โดยมี 2 ปัจจัยหลัก คือ การเพิ่มผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ ($Y_{MPO}$) และการลดต้นทุนของสาหร่ายแห้งแบบผง ($C_{DM}$) โดย $Y_{MPO}$ สามารถเพิ่มได้จากการพัฒนากระบวนการไพโรไลซิสผ่านเครื่องที่ใหญ่ขึ้น และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสมากขึ้น ส่วน $C_{DM}$ มีสาเหตุมาจากต้นทุนค่าสารอาหารที่เป็นสารเคมีที่สูงมาก ซึ่งถ้าหากสามารถพัฒนาสูตรอาหารต้นทุนต่ำที่ให้ผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ดีก็อาจจะทำให้ราคา $C_{DM}$ ลดลงได้

นอกจากนี้ถ้าหากมีการสนับสนุนจากภาครัฐในด้านการเงิน (Government subsidies) สำหรับการผลิตน้ำมันที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่มีการลดขยะอันตราย ลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ลดการปลดปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเป็นการสนับสนุนการผลิตน้ำมันที่มาจากแหล่งชีวมวลในประเทศ จะทำให้การผลิตน้ำมัน MLB มีความเป็นไปได้มากขึ้นในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 5
# ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

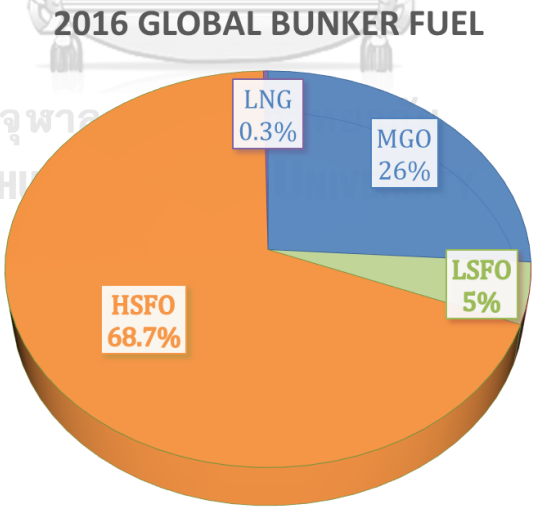
การศึกษาในงานวิจัยนี้ มุ่งประโยชน์การศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ของน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เพื่อทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำสำหรับธุรกิจเรือขนส่งเป็นสำคัญ

## 5.1 การศึกษาตลาดเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง

### 5.1.1 ตลาดเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งในปัจจุบัน

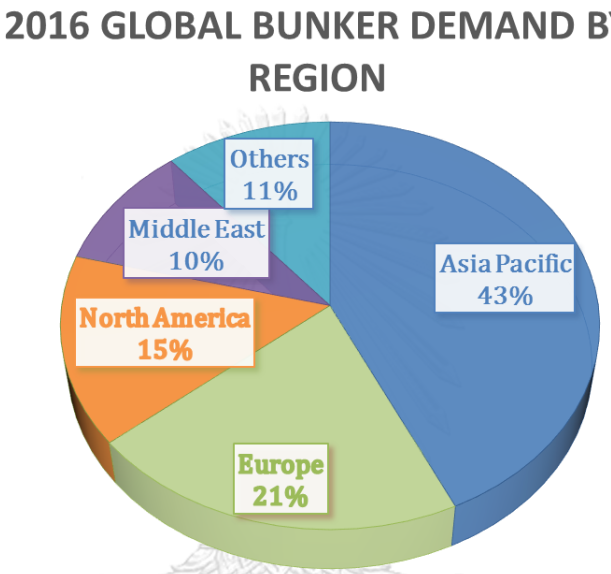
ตลาดทั่วโลกของเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งมีมูลค่า 98,111 ล้านเหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2016 และถูกคาดการณ์ว่าจะพุ่งไปถึง 147,008 ล้านเหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2023 ด้วย CAGR 5.9% (Reuters.com) โดยมีชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเรือขนส่งได้แก่ MGO, MDO, LNG, LSFO และ HSFO ซึ่ง HSFO ที่ใช้มี 2 ประเภทคือ IFO180 และ IFO380

ตลาดของเชื้อเพลิงเรือขนส่งในปี 2016 แสดงดังในรูปที่ 49 พบว่าในปัจจุบันยังใช้น้ำมัน HSFO สูงถึง 68.7% และ MGO 26% ส่วน LSFO ยังพบการใช้ค่อนข้างน้อยเพียง 5% และ มีการใช้ LNG 0.3%




รูปที่ 49 ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเรือขนส่งทั่วโลกในปี ค.ศ. 2016
(ที่มา: PTT PRISM Research)

เมื่อพิจารณาการใช้เชื้อเพลิงตามภูมิภาค พบว่าภูมิภาคเอเชียแปซิฟิคมีการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งมากที่สุดถึง 43% (รูปที่ 50) และมีอัตราการเติบโตที่สูงที่สุดในโลกนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียง 1,000 กิโลบาร์เรลต่อวัน ซึ่งประเทศสิงคโปร์เป็นประเทศที่มีการซื้อขายเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งมากที่สุดในภูมิภาค โดยมีปริมาณมากกว่า 50% ของเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งที่มีการซื้อขายในเอเชียแปซิฟิค เนื่องจากมีตำแหน่งที่เหมาะสมในการเป็นศูนย์กลางของการซื้อขาย



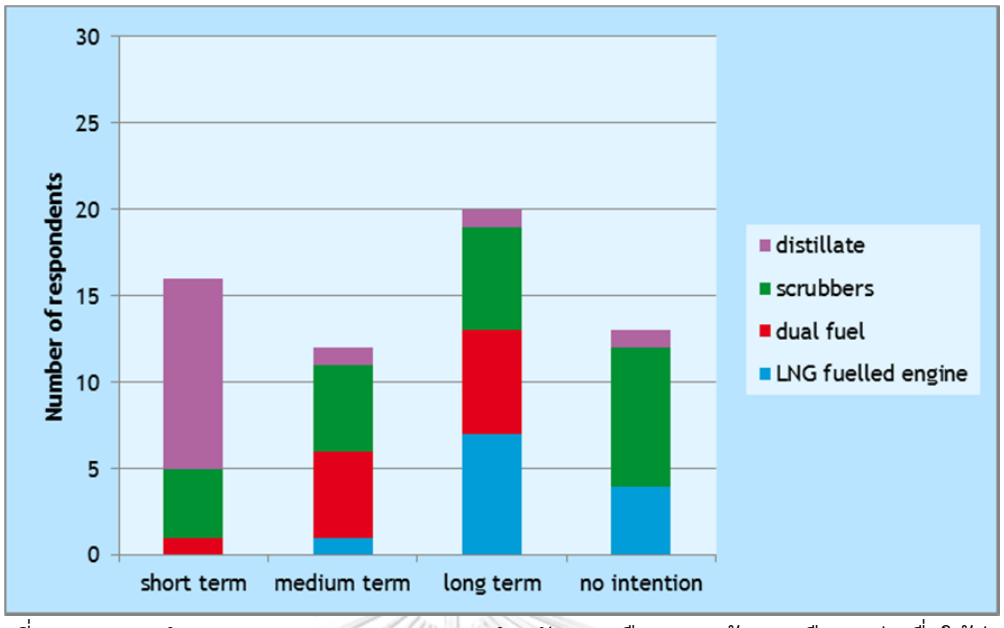

รูปที่ 50 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งแยกตามภูมิภาคในปี ค.ศ. 2016
(ที่มา: PTT PRISM Research)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.2 การวิเคราะห์ตลาดเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งเมื่อ IMO ประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ

จากผลการศึกษาของ Lloyds Register (Lloyds Register, 2012) จากเจ้าของเรือขนส่งประเภทต่างๆ จำนวน 30 ราย (รูปที่ 51) เพื่อให้สามารถผ่านข้อกำหนดของ IMO เรื่องการใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ พบข้อสังเกตที่สำคัญดังนี้

1) MGO หรือ LSFO เป็นทางเลือกในระยะสั้นของเจ้าของเรือในการเลือกใช้งานเชื้อเพลิงโดยที่ไม่ต้องมีการลงทุนเปลี่ยนแปลงระบบ
2) ระบบ Scrubber เป็นทางเลือกในระยะกลางของเจ้าของเรือขนส่ง
3) ระบบ LNG เป็นทางเลือกในระยะกลางและระยะยาวของเจ้าของเรือขนส่ง



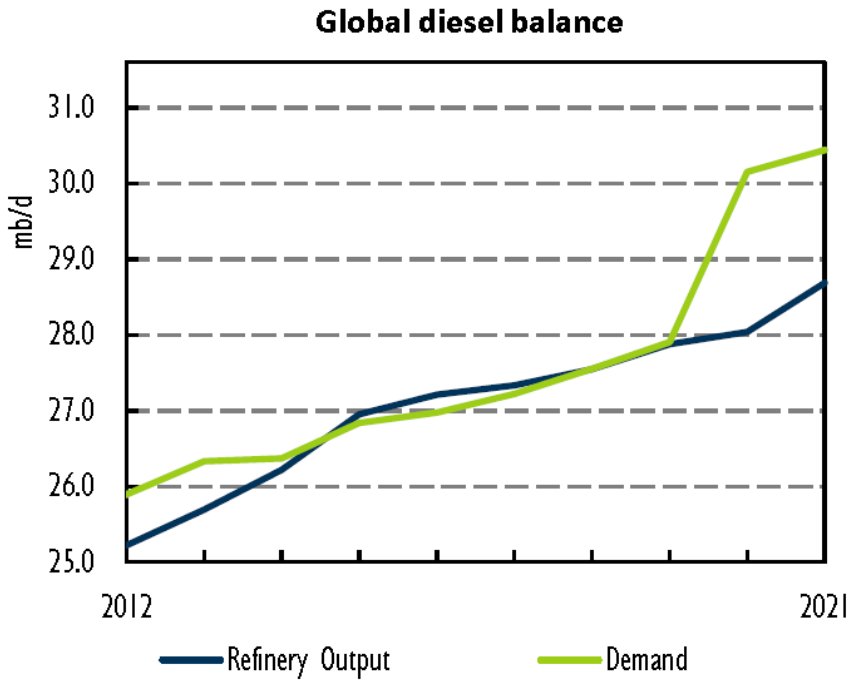

รูปที่ 51 ผลการสำรวจของ Lloyds Register สำหรับทางเลือกของเจ้าของเรือขนส่งเพื่อให้ผ่านข้อกำหนดของ IMO เรื่องเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ

(Lloyds Register, 2012)

โดยจากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเลือกใช้ระบบและเชื้อเพลิงต่างๆ ที่เป็นไปได้มากที่สุดของสำนักวิเคราะห์ต่างๆ มีได้ 2 แนวทาง

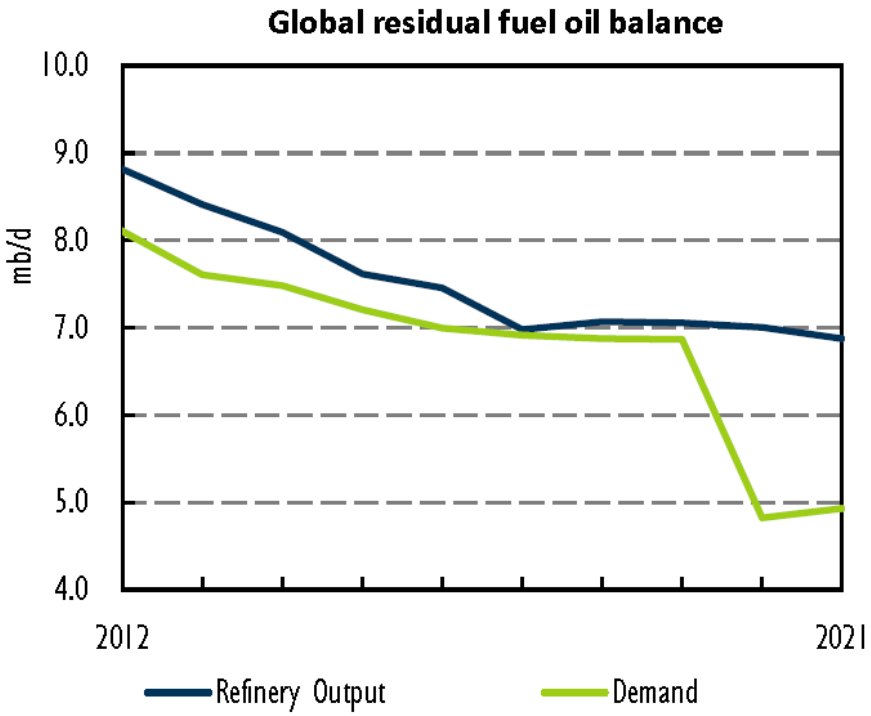
<u>การวิเคราะห์แนวทางที่ 1: คาดการณ์ว่าเรือขนส่งจะมีการติดตั้งระบบ Scrubber เพิ่มมากขึ้น</u>

จากการวิเคราะห์ตลาดจากสำหรับเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งหลังจากประกาศของ IMO เรื่องการใช้ LSFO พบว่าในช่วงแรกหลังจากประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ จะทำให้การใช้ MGO ที่มีกำมะถันต่ำเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและในช่วงหลังจากนั้น ปริมาณการใช้ HSFO จะเพิ่มขึ้นทดแทน ดังแสดงในรูปที่ 52-56 เนื่องจากคาดการณ์ว่าเรือจะมีการติดตั้งระบบ Scrubber มากขึ้นเรื่อยๆ นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2019 แต่อาจจะติดปัญหาเรื่องผู้ให้บริการติดตั้งมีศักยภาพในการติดตั้งจำกัด และการเข้าถึงแหล่งเงินทุนเพื่อติดตั้งระบบ Scrubber ของเจ้าของเรืออาจจะต้องใช้ระยะเวลา ทำให้เรือที่มีระบบ Scrubber ยังมีน้อยในช่วงแรก แต่จะมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยระยะเวลาการคืนทุนของระบบ Scrubber จะมีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆ ถ้าหากความแตกต่างของราคา HSFO กับ Distillate หรือ MGO มีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 57



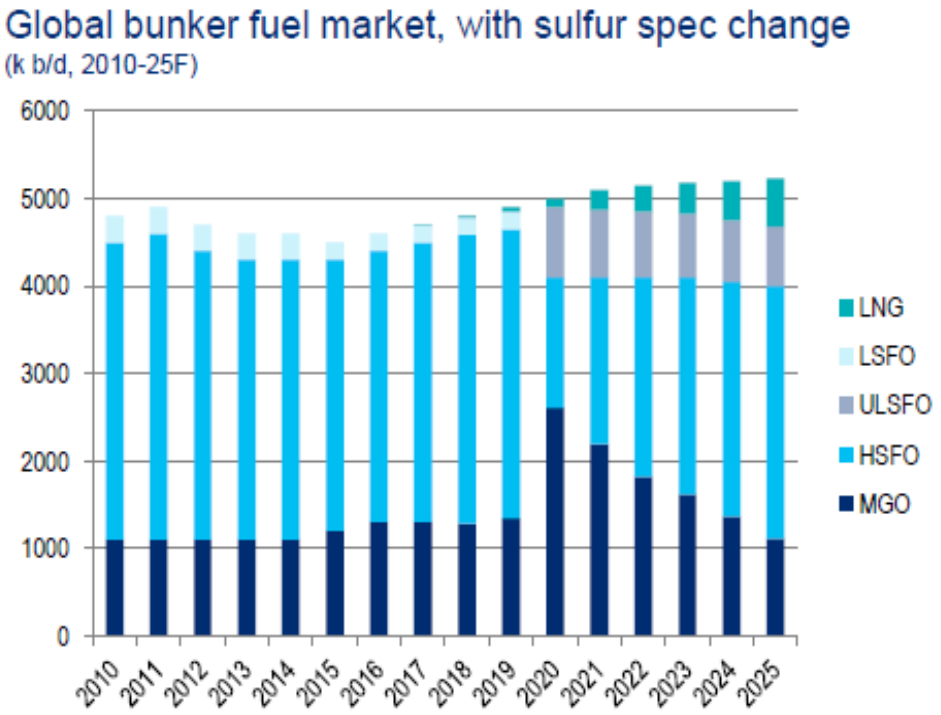

รูปที่ 52 อุปสงค์และอุปทานของน้ำมันดีเซลของโลกในช่วง 2012-2021

(International Energy Agency, 2016)



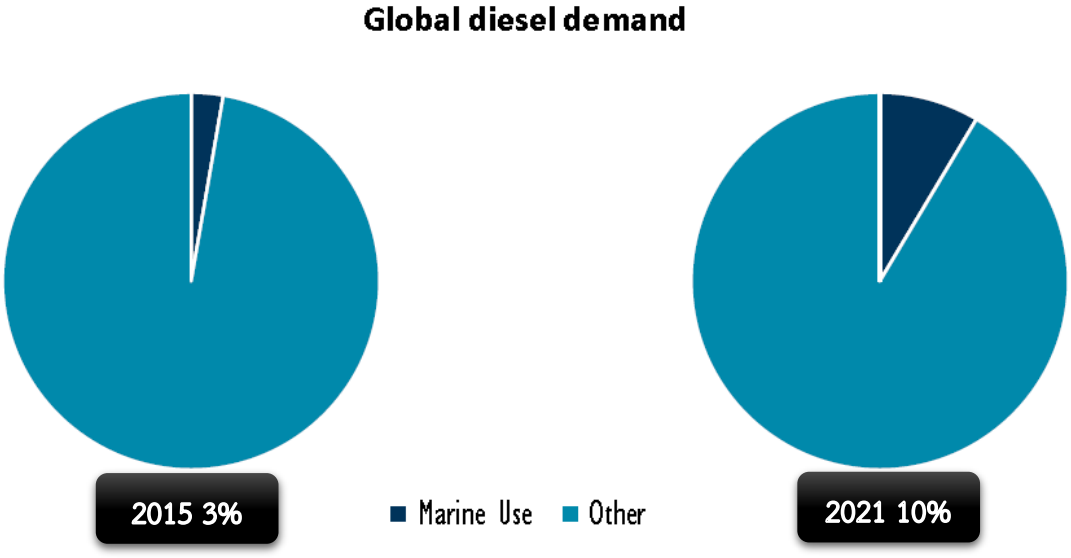

รูปที่ 53 อุปสงค์และอุปทานของ HFO ในช่วง 2012-2021

(International Energy Agency, 2016)



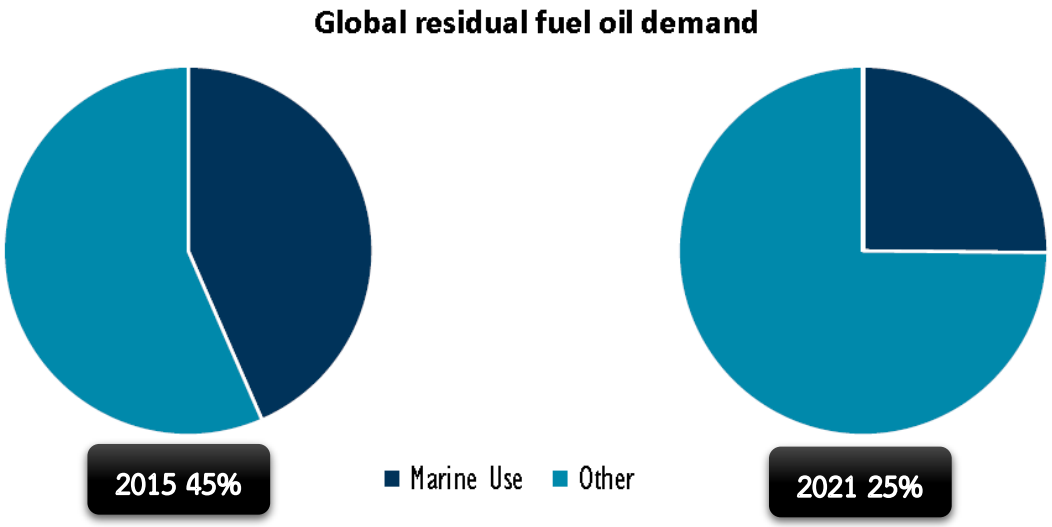

รูปที่ 54 การคาดการณ์ตลาดของเชื้อเพลิงขนส่งก่อนและหลังประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำของ IMO ในปี ค.ศ. 2020

(ที่มา: PTT PRISM Research)

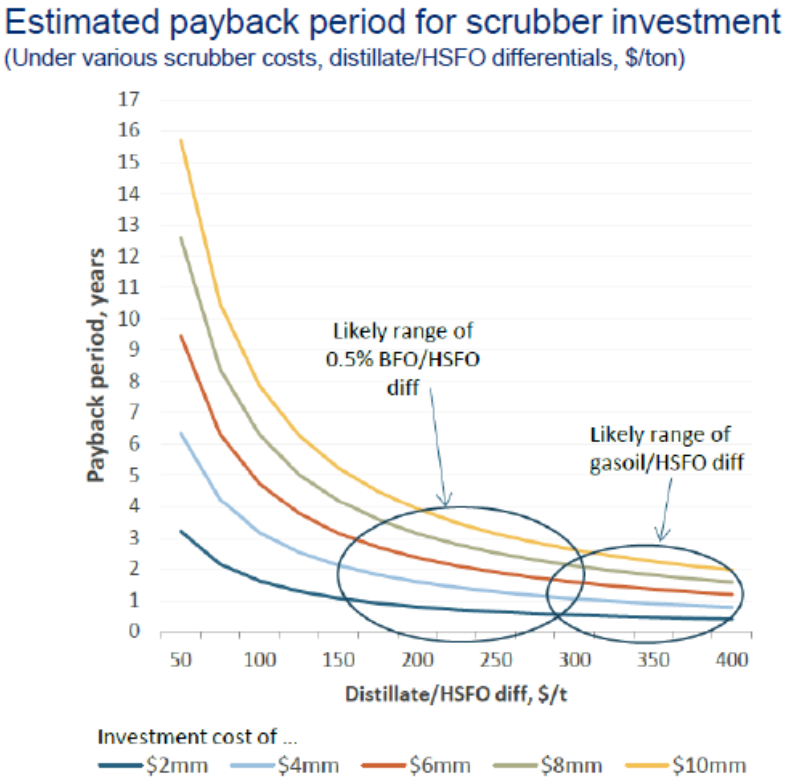



รูปที่ 55 การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในเรือขนส่งจากปี ค.ศ. 2015 และ ค.ศ. 2021

(International Energy Agency, 2016)




รูปที่ 56 การคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำมันเตาในเรือขนส่งจากปี ค.ศ. 2015 และ ค.ศ. 2021 (International Energy Agency, 2016)

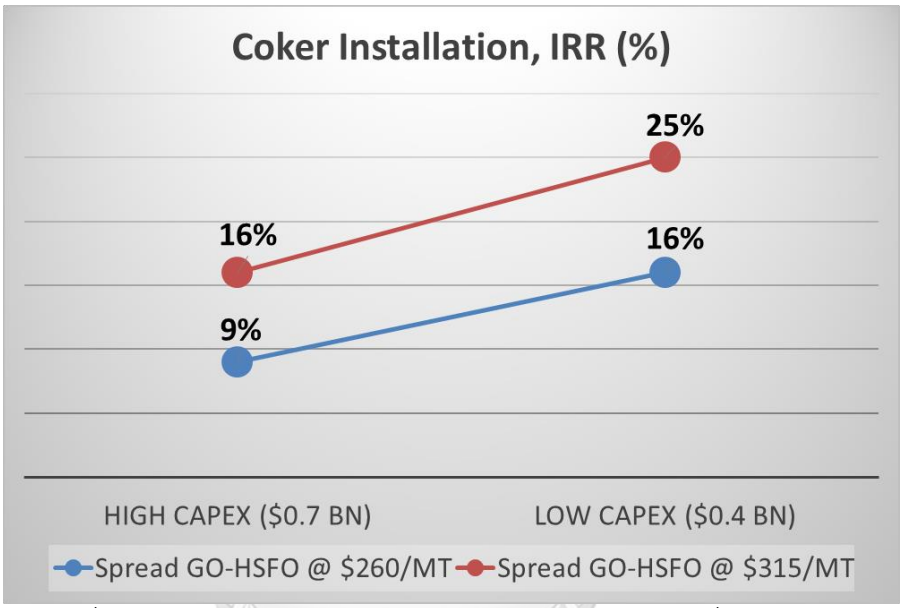



รูปที่ 57 ระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งระบบ Scrubber เมื่อเทียบกับราคาที่แตกต่างของ MGO กับ HSFO

(ที่มา: PTT PRISM Research)

<u>การวิเคราะห์แนวทางที่ 2: เรือจะไม่มีการติดตั้งระบบ Scrubber และผู้ผลิตต้องผลิตเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ ได้แก่ MGO หรือ LSFO เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง</u>

โรงกลั่นปิโตรเลียมอาจพิจารณาการผลิต MGO เพิ่มเติมด้วยการติดตั้ง Coker unit เพื่อทำให้สามารถผลิต MGO ได้เพิ่มขึ้น หรือผลิตน้ำมัน LSFO ที่เกิดจากการผสม Gas oil กับ HSFO โดยเมื่อพิจารณาผลตอบแทนการลงทุนในช่วง 9-25% ดังรูปที่ 58




รูปที่ 58 ผลตอบแทนการลงทุนใน Coker unit สำหรับโรงกลั่นปิโตรเลียม

(ที่มา: PTT PRISM Research)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>กล่าวโดยสรุป</u>

ยังมีความไม่แน่นอนทั้งด้านการผลิตจากโรงกลั่น และการใช้งานของเรือขนส่ง ขึ้นอยู่กับว่าฝ่ายใดเป็นผู้ลงทุน และกำมะถันจะถูกกำจัดออกที่จุดใด จากโรงกลั่น หรือจากเรือขนส่งที่ทิ้งลงสู่ทะเล และความแตกต่างระหว่างราคา MGO และ HSFO มีผลต่อการพิจารณาลงทุนของทั้งเรือขนส่งและโรงกลั่น นอกจากนี้ยังเกิดความวิตกกังวลและความไม่มั่นใจในนโยบายและกฎระเบียบที่จะออกมาจาก IMO ในอนาคต

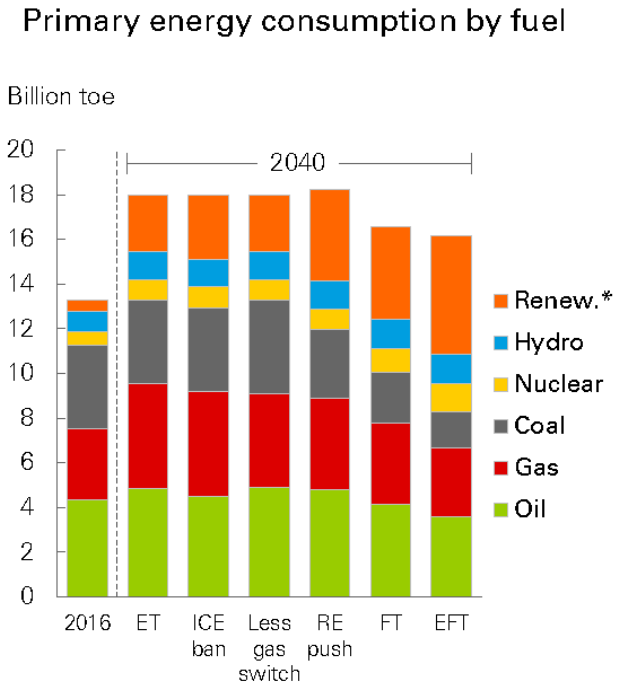
### 5.2 ทิศทางพลังงานของโลก

จากรายงานของ BP Energy Outlook ในปี ค.ศ. 2018 พบว่าทิศทางเศรษฐกิจของโลกจะเพิ่มขึ้นหลายเท่าภายในปี ค.ศ. 2040 ซึ่งเกิดจากเศรษฐกิจที่เติบโตอย่างก้าวกระโดดของหลาย

ประเทศที่กำลังพัฒนา รวมถึงการคาดการณ์จำนวนประชากรของโลกที่จะเพิ่มขึ้นจาก 7.6 พันล้านคน ในปัจจุบันเป็น 9.2 พันล้านคนในปี ค.ศ. 2040 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความต้องการด้านพลังงานที่พุ่งสูงขึ้น แม้ว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานของโลกจะสูงขึ้นก็ตาม พบว่าความต้องการด้านพลังงานจะเพิ่มขึ้น 33% ภายในปี ค.ศ. 2043 โดยเกิดอุปสงค์จากภาคอุตสาหกรรมที่มีความต้องการด้านพลังงานมากกว่าครึ่งหนึ่งของความต้องการที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด ซึ่งมากกว่าครึ่งหนึ่ง เกิดจากประเทศจีนและอินเดียที่มีอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจสูง

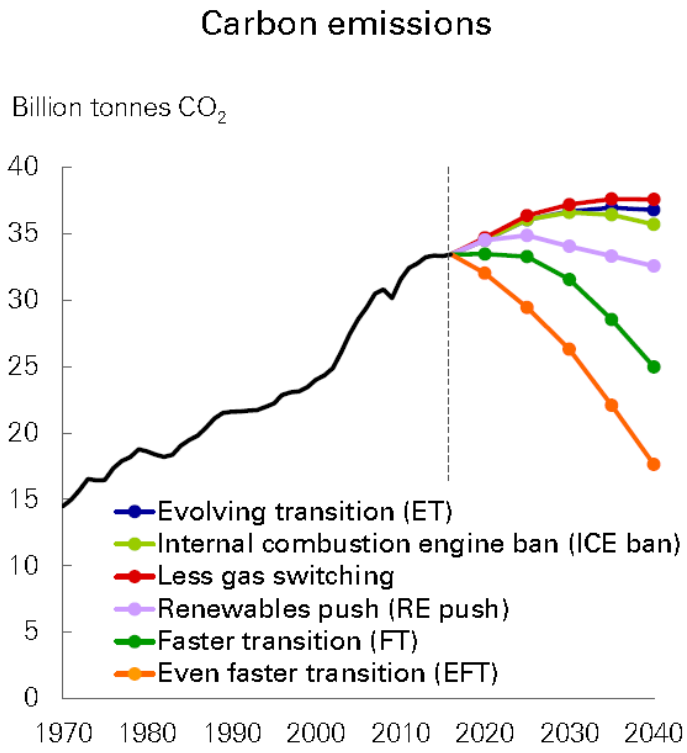
ภายในปี ค.ศ. 2040 ทิศทางการใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้แก่ พลังงานลม แสงอาทิตย์ ความร้อนใต้พิภพ ชีวมวลและพลังงานชีวภาพ มีอัตราการเติบโตที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานอื่นๆ มีปริมาณประมาณ 40% ของอัตราการเติบโตทางด้านอุปทานของพลังงานทั้งหมด นอกจากนี้การเติบโตของการใช้ LNG มีทิศทางสูงขึ้นและมีการใช้ที่แพร่หลายขึ้นทั่วโลก สวนทางกับการเติบโตของการใช้ถ่านหินที่ค่อนข้างคงที่และลดน้อยลง ดังรูปที่ 59

ปัญหาด้านการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$ Emission) ที่เพิ่มขึ้น เป็นปัญหาที่สำคัญของโลกที่ต้องการการควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิดเพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยลง จากความตกลงปารีส (Paris Agreement) ในปี ค.ศ. 2015 ดังรูปที่ 60 โดย Evolving Transition (ET) Scenario เป็นเหตุการณ์จำลองจากพื้นฐานของนโยบายภาครัฐ กฎระเบียบ เทคโนโลยี สังคมและสิ่งแวดล้อมจากอดีตจนถึงปัจจุบัน




รูปที่ 59 ทิศทางการใช้พลังงานชนิดต่างๆ เป็นแหล่งพลังงานหลักในอนาคต

(BP, 2018)



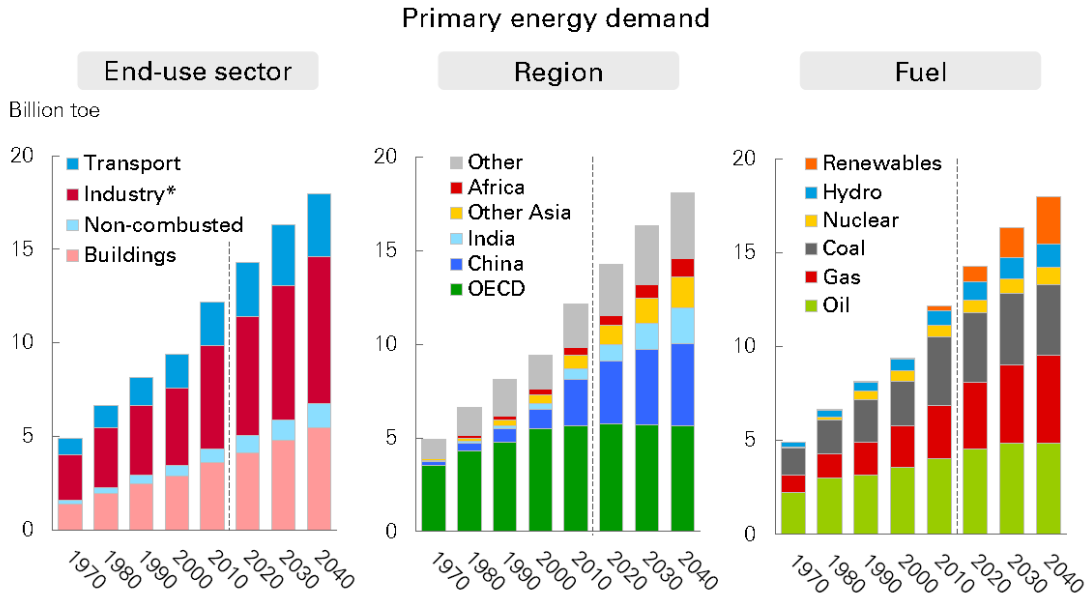

รูปที่ 60 ทิศทางการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคต

(BP, 2018)

จากแนวโน้มของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคต ทำให้มีแนวคิดที่จะลดการปลดปล่อยก๊าซดังกล่าวด้วยแบบจำลองเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน เช่น การยกเลิกการจำหน่ายและใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) หรือนโยบายที่จะผลักดันการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักที่เพิ่มมากขึ้น หรือนโยบายการลดการใช้ถ่านหินเพื่อเปลี่ยนไปใช้ก๊าซธรรมชาติทดแทน

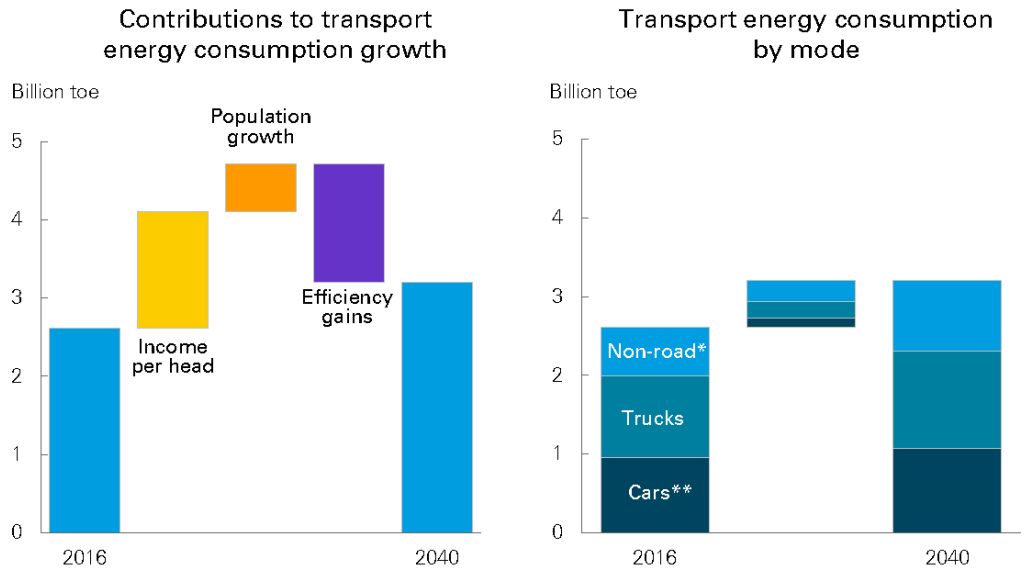
ภาพรวมทิศทางการใช้พลังงานหลักในภาคธุรกิจ ภูมิภาค และชนิดของแหล่งพลังงานแสดงให้เห็นในรูปที่ 61 ซึ่งพบว่าภาคอุตสาหกรรมยังเป็นหลักในด้านความต้องการพลังงาน และเติบโตสูงขึ้นที่ภูมิภาคอินเดียและจีน โดยมีการเติบโตด้านการใช้พลังงานหมุนเวียนและก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 61 ทิศทางความต้องการใช้พลังงานหลักตามภาคธุรกิจ ภูมิภาคและชนิดของพลังงาน (BP, 2018)

ในภาคการขนส่ง พบว่าในช่วงปี ค.ศ. 2016 ถึง 2040 อัตราความต้องการพลังงานเติบโตขึ้นไม่รวดเร็วเหมือนช่วงก่อนปี ค.ศ. 2016 เนื่องจากเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น แม้ว่าจะมีความต้องการจากจำนวนประชากรโลกที่มีเพิ่มขึ้นและมีรายได้ต่อหัวเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนของธุรกิจเรือขนส่ง พบว่ามีการเติบโตตาม GDP ของโลกที่คาดว่าจะเพิ่มเป็น 2 เท่าในปี ค.ศ. 2040 ดังรูปที่ 62




รูปที่ 62 การคาดการณ์การเติบโตของพลังงานในภาคขนส่ง (BP, 2018)

**5.3 การศึกษาผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากประกาศของ IMO**

การศึกษาข้อมูลของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดของการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ จากการประกาศของ IMO โดยศึกษาจากการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดในประเทศไทย มีรายละเอียดข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและการวิเคราะห์แล้ว ดังนี้

5.3.1 ผู้ผลิต ได้แก่ โรงกลั่นปิโตรเลียมต่างๆ (Refineries)

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการผลิตน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งของโรงกลั่นต่างๆ ในประเทศไทย จำนวน 4 คน เพศชาย 3 คน เพศหญิง 1 คน อายุอยู่ในช่วงระหว่าง 35-55 ปี ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรี มีประสบการณ์การทำงานไม่น้อยกว่า 10 ปี มีผลการศึกษา ดังนี้

1) ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำและการปรับตัวของผู้ผลิตและทิศทางในอนาคต เพื่อตอบสนองกับประกาศการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

<u>แนวคิดที่ 1</u>

ผู้ผลิต 1 ราย มีแนวคิดในการผลิตน้ำมันกำมะถันต่ำ เนื่องจากการที่ไม่สามารถลงทุนในอุปกรณ์การผลิตที่สามารถปรับน้ำมันเตาในปัจจุบันให้เป็นน้ำมันเตาที่มีมูลค่าสูงขึ้นได้ โดยแนวคิดในการทำคือ การเสาะหา Sweet crude ที่มีปริมาณกำมะถันไม่เกิน 0.5% เพื่อนำมาผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ แต่ต้องพิจารณาปัจจัยได้แก่ ราคา ความคุ้มค่าในการผลิต จุดคุ้มทุนของการผลิต ชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่น ตลาดของแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยการพิจาณาแบบนี้เนื่องจากมีความคิดเห็นว่า การติดตั้งระบบ Scrubber ยังมีเจ้าของเรือขนส่งที่ติดตั้งน้อยราย (ประมาณ 10-20%) เนื่องจากราคาค่อนข้างสูง

<u>แนวคิดที่ 2</u>

ผู้ผลิต 2 ราย ไม่มีแนวคิดในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ โดยมุ่งเป้าหมายไปที่การผลิต Gas oil 0.05%S หรือ Gas Oil 0.5%S เพื่อจำหน่ายเป็นน้ำมันเตากำมะถันต่ำทดแทน โดยมีแนวคิดการลงทุนอุปกรณ์การผลิต ได้แก่ ระบบ Residual fluid catalytic cracking (RFCC) หรือ Coker Unit ว่าจะเปลี่ยนการผลิตน้ำมันเตา 3.5%S ทั้งหมดที่มีในปัจจุบันให้เป็นน้ำมันประเภท Gas oil ที่มีมูลค่าสูงกว่าและมีค่ากำมะถันค่อนข้างต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

ผู้ผลิตทั้ง 3 ราย มีความกังวลใจจากประกาศดังกล่าว โดยมีความกังวลใจในด้านการเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิต การลงทุนอุปกรณ์ และทิศทางของตลาดเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเรือขนส่งในอนาคตว่าจะเป็นในรูปแบบใด เนื่องจากยังมีความไม่แน่นอนของผู้ใช้ในการเลือกใช้ระบบ Scrubber ระบบ LNG หรือใช้ LSFO ที่มีความแตกต่างในชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด นอกจากนี้ยังกังวลถึงกฎระเบียบของ IMO ที่จะมีขึ้นในอนาคตที่กระทบเป็นอย่างยิ่งต่อการพิจารณาเลือกการลงทุนผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในโรงกลั่น

3) ความคิดเห็นในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ผู้ผลิตทั้ง 3 ราย ให้ความเห็นว่ามีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแม้ว่าราคาที่ผลิตได้จากการทดลองยังสูงกว่าราคาของน้ำมันเตากำมะถันต่ำที่ใช้ในตลาดในปัจจุบัน โดยให้ความเห็นเพิ่มเติมว่า ควรจะผลิตจากโรงงานที่ปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (ULO) และนำน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็ก (MPO) เข้ามาผสมในกระบวนการ ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดของการนำไปจำหน่ายทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำในปัจจุบันคือ คุณภาพที่ต้องผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 ทั้งหมด และราคาต้องสามารถแข่งขันได้ ส่วนในอนาคต ถ้าหากราคาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมยังคงสูงขึ้นเรื่อยๆ ราคาของนวัตกรรมที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำมาแข่งขันได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3.2 ผู้จำหน่าย ได้แก่ ผู้ขายต่างๆ (Traders)

M PLUS ENERGY PTE LTD

Marine Oil International Ltd.

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการจำหน่ายน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งของผู้จำหน่ายต่างๆ ในประเทศไทย จำนวน 3 คน เพศชาย 2 คน เพศหญิง 1 คน อายุอยู่ในช่วงระหว่าง 35-60 ปี ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรี มีประสบการณ์การทำงานไม่น้อยกว่า 10 ปี มีผลการศึกษา ดังนี้

1) ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของลูกค้าในปัจจุบัน และปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของลูกค้าเมื่อ IMO ประกาศให้ใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ราคาเป็นปัจจัยหลักในการซื้อน้ำมันของลูกค้าในปัจจุบัน โดยผู้จำหน่ายทั้ง 3 ราย แจ้งว่าน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการราคาต่ำที่สุด เพื่อลดภาระค่าขนส่งทางเรือ นอกจากนี้คือเรื่องคุณภาพของน้ำมันที่ต้องผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำของ IMO และ ISO 8217

เมื่อ IMO ประกาศให้ใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของลูกค้ายังอยู่ที่ระบบของเรือลูกค้าเป็นหลัก ซึ่งถ้าลูกค้าติดตั้งระบบ Scrubber ก็สามารถซื้อน้ำมันเตากำมะถันสูงที่มีราคาเดิมได้ หรือเรือที่ติดตั้งระบบ LNG ก็สามารถซื้อ LNG เป็นเชื้อเพลิงได้ ส่วนลูกค้าที่ไม่ได้ติดตั้งระบบใดๆ เพิ่มเติมก็สามารถซื้อน้ำมัน LSFO หรือ Gas Oil 0.5%S ได้ที่มีราคาสูงกว่า ดังนั้นปัจจัยขึ้นอยู่กับระบบที่ลูกค้าติดตั้ง

2) ปัจจัยในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ผู้จำหน่ายทั้ง 3 ราย ให้ความเห็นว่า ถ้าหากมีผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ที่มีราคาแข่งขันได้ และคุณภาพผ่านมาตรฐานของ IMO และ ISO 8217 ก็สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำได้ ปัจจัยในการเลือกซื้อของลูกค้าในปัจจุบันขึ้นกับราคาของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก โดยขอให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำก็เป็นสิ่งที่เพียงพอในการพิจารณาของลูกค้า

3) ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

ผู้จำหน่ายทั้ง 3 ราย ไม่มีความกังวลจากประกาศดังกล่าว เนื่องจากสามารถเลือกขายผลิตภัณฑ์ที่มีได้ทั้งหมดตามระบบที่มีของลูกค้า แต่ผู้ขายมีความกังวลถึงผู้ผลิตหรือโรงกลั่นน้ำมันต่างๆ ว่าจะเลือกผลิตน้ำมันประเภทใด ที่ควรต้องออกแบบให้เป็นไปตามระบบของลูกค้ามากที่สุด

4) ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ผู้จำหน่ายทั้ง 3 ราย ให้ความเห็นว่า สิ่งที่สำคัญที่สุดในด้านของผู้จำหน่ายคือ ราคาของผลิตภัณฑ์ ถ้าหากสามารถสร้างนวัตกรรมที่มีคุณภาพผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำของมาตรฐาน IMO และ ISO 8217 แล้วและราคาแข่งขันได้ ทางผู้ขายสามารถจำหน่ายได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3.3 ผู้ใช้ ได้แก่ เจ้าของเรือต่างๆ (Ship owners)

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้หรือการจัดซื้อน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งต่างๆ ในประเทศไทย จำนวน 3 คน เพศชาย 3 คน อายุอยู่ในช่วงระหว่าง 45-55 ปี ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรี มีประสบการณ์การทำงานไม่น้อยกว่า 20 ปี ดำรงตำแหน่งระดับผู้บริหาร มีผลการศึกษาดังนี้

1) ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของเจ้าของเรือขนส่งในปัจจุบัน และปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันของเจ้าของเรือขนส่งเมื่อ IMO ประกาศให้ใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ

เจ้าของเรือทั้ง 3 ราย พิจารณาการซื้อน้ำมันเตาในปัจจุบันจากราคา (Price) คุณภาพ (Quality) และความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) โดยในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เรือขนส่งส่วนใหญ่เติมน้ำมันเตาที่ประเทศสิงคโปร์ เนื่องจากมีราคาต่ำที่สุด และเติมน้ำมันเตาที่ประเทศอื่นๆ ตามปริมาณความจำเป็นขั้นต่ำเนื่องจากมีราคาแพงกว่า และพิจารณาน้ำมันเตาที่มีคุณภาพจากผู้ขายที่เชื่อถือได้ มีความหนืดที่เหมาะสม เมื่อใช้แล้วไม่เกิดปัญหาต่างๆ เช่น น้ำมันนอนก้นถัง เนื่องจากปัญหาการผสมน้ำมันที่ไม่มีคุณภาพเข้ามา และผู้ขายที่มีน้ำมันเตาจำหน่ายอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีปัญหาเรื่อง Supply

เมื่อ IMO ประกาศใช้น้ำมันเตาที่มีกำมะถันไม่เกิน 0.5% ในปี พ.ศ. 2563 เจ้าของเรือมีทางเลือกต่างๆ ในการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง ดังนี้

1. ซื้อน้ำมันเตากำมะถันต่ำ (LSFO) ไม่ต้องติดตั้งระบบ Scrubber
2. ซื้อน้ำมัน Gas Oil 0.5% ไม่ต้องติดตั้งระบบ Scrubber
3. ติดตั้งระบบ Scrubber และใช้น้ำมันเตากำมะถันสูง (IFO 380, 3.5%S)
4. ติดตั้งระบบ LNG และใช้เชื้อเพลิงเป็น LNG

การติดตั้งระบบ Scrubber พบว่าไม่มีเจ้าของเรือขนส่งรายใดเลยที่ระบุการติดตั้งระบบดังกล่าว เนื่องจากมีประเด็นปัญหาเรื่องราคาการติดตั้งที่ระบบ Scrubber มีราคาสูงในช่วง 4-8 ล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งเป็นการลงทุนที่จะสร้างภาระทางการเงินให้กับเจ้าของเรือ โดยที่ราคาระบบ Scrubber ดังกล่าวคิดเป็น 10% ของเงินลงทุนค่าเรือทั้งหมด ที่ปกติแล้วมี

IRR อยู่ในช่วง 10-12% ภายในระยะเวลา 20 ปีตามอายุการใช้งานของเรือ ซึ่งการลงทุนระบบ Scrubber ดังกล่าวจะทำให้เกิดความไม่คุ้มค่าในการลงทุน และระบบ Scrubber มีอายุการทำงานได้ค่อนข้างน้อย อยู่ในช่วง 3-5 ปี นอกจากนี้ เนื่องจากระบบ Scrubber ต้องมีการทิ้งกำมะถันที่บำบัดได้จากเรือ ซึ่งปัจจุบันเรือที่ติดตั้งระบบดังกล่าวแล้ว ทำการทิ้งกำมะถันดังกล่าวลงทะเล ซึ่งแม้ไม่มีกฎระเบียบเพื่อควบคุมการทิ้งกำมะถันดังกล่าวลงทะเล แต่เริ่มมีองค์กรด้านสิ่งแวดล้อมระบุแล้วว่ามีผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเล (Marine ecosystem)

การติดตั้งระบบ LNG พบว่าไม่มีเจ้าของเรือขนส่งรายใดเลือกการติดตั้งระบบ LNG ในเรือเก่าของตัวเอง เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าลงทุนสูงมาก และในแต่ละประเทศ ยังไม่มีความชัดเจนเรื่อง Supply ของ LNG ซึ่งถ้าหากติดตั้งระบบดังกล่าวแล้ว เมื่อขนส่งไปบางประเทศที่ยังไม่มีการจำหน่าย LNG จะทำให้เกิดปัญหาการเติมเชื้อเพลิงให้กับเรือได้

การซื้อน้ำมัน LSFO หรือ Gas oil 0.5%S เป็นทางเลือกที่ทุกๆ เจ้าของเรือขนส่งเลือกใช้ แม้ว่าราคาน้ำมันดังกล่าวจะมีราคาที่สูงขึ้น ทำให้ค่าขนส่งสูงขึ้น แต่เจ้าของเรือขนส่งทุกรายคาดว่าจะสามารถผลักภาระค่าขนส่งที่สูงขึ้นดังกล่าวให้กับผู้ว่าจ้างขนส่ง (Ship charterer) ได้ ซึ่งเจ้าของเรือไม่ต้องกังวลเรื่องการลงทุนติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ซึ่งโดยปัจจุบันต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่ประมาณ 20-25% ของต้นทุนค่าเดินเรือ ซึ่งการเพิ่มต้นทุนดังกล่าวจากน้ำมัน LSFO หรือ Gas oil 0.5%S อาจจะกระทบไม่มากต่อต้นทุนรวมทั้งหมดของเจ้าของเรือ และกระทบต่อราคาค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้นไม่มาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) ปัจจัยในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

ปัจจัยที่พิจารณาสำคัญที่สุดสำหรับเจ้าของเรือทุกราย คือ การที่ไม่ต้องลงทุนอุปกรณ์เพิ่มเติม เนื่องจากธุรกิจเรือขนส่งเป็นธุรกิจที่มีกำไรค่อนข้างน้อย และระยะเวลาการคืนทุนค่อนข้างนาน และเกณฑ์ในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ คือ ต้องผ่านกฎระเบียบของ IMO และราคาที่แข่งขันกับน้ำมันเตากำมะถันต่ำได้

3) ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

เจ้าของเรือขนส่งทั้ง 3 ราย มีความวิตกกังวลถึงชนิดของเชื้อเพลิงที่มีในท่าเรือของประเทศต่างๆ เนื่องจากความหลากหลายของเชื้อเพลิงและระบบต่างๆ ที่ติดตั้งเพื่อให้ผ่าน

กฎระเบียบของ IMO ดังที่ได้กล่าวมาในข้อ 2) และกังวลถึงประกาศที่จะมีตามมาในอนาคต ซึ่งเป็นสิ่งที่คาดเดาไม่ได้ และมีผลกระทบเป็นอย่างยิ่งต่อธุรกิจเรือขนส่ง

4) ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

เจ้าของเรือทั้ง 3 ราย ให้ความเห็นว่า ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ น้ำมันเตาที่ได้ต้องมีคุณภาพที่ต้องผ่านตามมาตรฐานของ IMO และ ISO 8217 และราคาที่แข่งขันกับน้ำมัน LSFO ในปัจจุบันได้ โดยเจ้าของเรือได้ให้ความเห็นที่น่าสนใจว่า ถ้าหากมีประกาศของ IMO ให้ใช้น้ำมันส่วนหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หรือสามารถลดโลกร้อนได้ หรือมีความช่วยเหลือจากภาครัฐในด้านเงินชดเชยในการผลิตเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จะทำให้น้ำมันผสมดังกล่าวมีความน่าสนใจในการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้จริง

5.3.4 ผู้ควบคุม ได้แก่ สำนักมาตรฐานเรือ กรมเจ้าท่า (Ship Standard Bureau, Marine department)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการควบคุมมาตรฐานน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งในประเทศไทย จำนวน 3 คน เป็นเพศชายทั้ง 3 คน อายุอยู่ในช่วงระหว่าง 40-50 ปี ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรี มีประสบการณ์การทำงานไม่น้อยกว่า 15 ปี มีผลการศึกษา ดังนี้

1) ผลกระทบและความกังวลจากการประกาศใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำของ IMO

ผู้ให้สัมภาษณ์ให้ข้อมูลว่า ประเทศไทยเป็นสมาชิกของ IMO นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 และยังเคยเป็นคณะมนตรีของ IMO ประเภทกลุ่ม C หลายสมัยจวบจนถึงปัจจุบัน โดยประเทศไทยเป็นภาคีของอนุสัญญาและพิธีสารของ IMO หลายฉบับ แต่ยังไม่ได้ลงนามในอนุสัญญาระหว่างประเทศว่าด้วยการป้องกันการปลดปล่อยมลภาวะทางทะเลจากเรือ (Marpol Annex VI) ที่ประเทศไทยมีแผนที่จะเข้าลงนามในอีก 2-3 ปีถัดจากนี้

กรมเจ้าท่า ในฐานะผู้ควบคุมกฎระเบียบการขนส่งทางเรือในประเทศไทย ไม่มีความกังวลต่อประกาศดังกล่าวในด้านของการเป็นผู้ควบคุมกฎระเบียบ เนื่องจากเมื่อมีผลบังคับใช้ทางกรมฯ มีความพร้อมที่จะดำเนินการตรวจสอบได้ทันที แต่มีความกังวลถึงผู้ประกอบการที่จะต้องรับภาระค่าใช้จ่ายจากราคาของ LSFO ที่สูงกว่าน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งในปัจจุบันค่อนข้างมาก หรือการเปลี่ยนไปใช้ MGO ที่สูงกว่าราคา IFO ในปัจจุบันถึง 200 เหรียญสหรัฐต่อตัน

2) การควบคุมกฎระเบียบดังกล่าวในประเทศไทยจาก IMO

ในปัจจุบัน กรมฯ มีเจ้าหน้าที่ตรวจสอบเรือขนส่งในทุกๆ ลำอยู่เป็นปกติ ซึ่งมีการให้ความรู้เรื่องและการทำความเข้าใจการลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเรือขนส่งทุกๆ ลำ โดยปกติเรือในประเทศยังไม่มีการควบคุมชนิดของน้ำมันที่ใช้ แต่ถ้าหากเป็นเรือที่ออกนอกประเทศ หรือเรือต่างประเทศจะมีการควบคุมปริมาณของกำมะถันที่ใช้ตามข้อบังคับของ IMO ซึ่งกรมเจ้าท่าจะเข้มงวดในตรวจชนิดของน้ำมันในเอกสาร BDM (Bunker Delivery Note) เพื่อการออกเอกสาร IAPP (International Air Pollution Prevention) ให้กับเรือขนส่ง แต่ถ้ามีการลงนามในอนุสัญญาดังกล่าว จะทำให้มีผลบังคับใช้กับเรือทั้งเรือแล่นภายในประเทศและเรือแล่นต่างประเทศ

3) ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำมันทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

กฎระเบียบของ IMO เป็นข้อบังคับที่ประเทศไทยต้องปฏิบัติหากมีการลงนามในอนุสัญญากับ IMO ซึ่งบังคับใช้ให้ประเทศไทยต้องมีการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำในเรือทุกประเภทเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สิ่งที่สามารถทดแทนได้ในปัจจุบัน คือ ระบบ Scrubber ที่ติดตั้งในเรือเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซพิษ ที่ยังทำให้สามารถใช้น้ำมันเตาที่มีกำมะถันสูงได้ โดย IMO ยอมรับระบบดังกล่าว แต่ยังมีความไม่ชัดเจน 100% เนื่องจากมีความกังวลการเปิดระบบ Scrubber ตลอดเวลาหรือไม่ขณะทำการขนส่ง หรือการใช้ LNG ที่ส่วนใหญ่เป็นเรือที่ต่อใหม่ หรือการเปลี่ยนไปใช้น้ำมันที่มีคุณสมบัติที่สูงกว่าและราคาแพง เช่น Gas Oil 0.05% นอกจากนี้ยังไม่พบเงื่อนไขอื่นๆ ในการใช้น้ำมันทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ

4) ความคิดเห็นในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กรมเจ้าท่าให้ความเห็นว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ ถ้าหากมีคุณภาพที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติต่างๆ ของ ISO 8217 และ IMO และนอกจากนี้ ยังมีความเห็นว่า ราคาที่ผลิตได้เป็นราคาในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งถ้าหากมีการผลิตในเชิงพาณิชย์จริง คาดว่าจะสามารถลดต้นทุนผลิตได้มากกว่า 3-5 เท่า

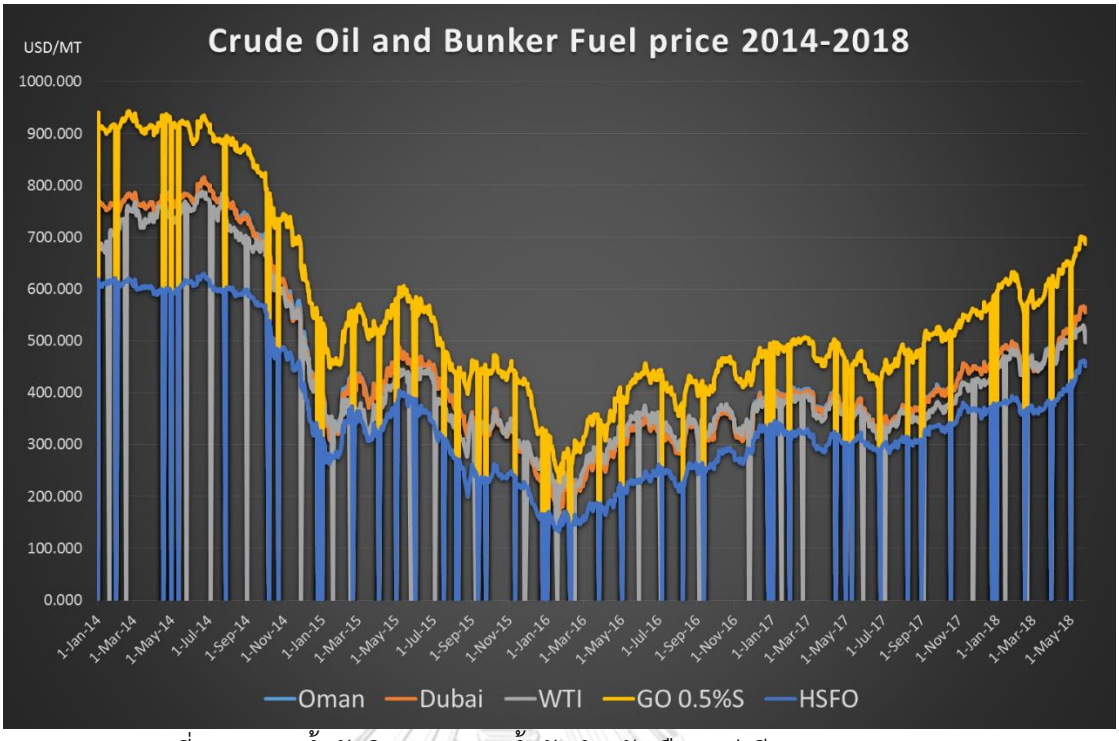
**5.4 การวิเคราะห์แนวโน้มราคาน้ำมันและต้นทุนของ MLB**

มีการคาดการณ์จากสำนักวิเคราะห์ต่างๆ ในปี ค.ศ. 2018 ว่า ถ้าหาก IMO ยังไม่เลื่อนประกาศการใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำในปี ค.ศ. 2020 จะทำให้ราคาน้ำมันดิบพุ่งทะยานมากกว่า 2 เท่าจากปัจจุบัน เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่สามารถผลิตน้ำมันที่มีกำมะถันต่ำได้อย่างเพียงพอ ซึ่งโรงกลั่นหลายโรงในโลกต้องลงทุนติดตั้งระบบ Coker unit เพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน HSFO ให้กลายเป็น MGO ซึ่งถ้าหากโรงกลั่นตัดสินใจลงทุนติดตั้งระบบ Coker unit วันนี้ ระบบจะมีความพร้อมในปี ค.ศ. 2022 ซึ่งไม่ทันต่อความต้องการใช้อย่างเร่งด่วนในปี ค.ศ. 2020

ราคาน้ำมันดิบอาจจะพุ่งสูงไปถึง 150 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรลจากวันนี้ที่ 60 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล ซึ่งเคยเกิดขึ้นมาก่อนเมื่อตอนที่ European Union (EU) ประกาศให้ใช้น้ำมันดีเซลกำมะถันต่ำ ทำให้ราคาน้ำมันดิบพุ่งขึ้นไปถึง 145 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรลจาก 55 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล เนื่องจากปัญหาด้านอุปทานของน้ำมันดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำมันดีเซลกำมะถันต่ำได้

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลราคาน้ำมันดิบ (Oman, Dubai, WTI) ราคา Gas oil 0.5%S และราคา HSFO ในช่วงปี ค.ศ. 2014 ถึงปัจจุบัน พบว่าราคาเฉลี่ยของราคา Gas Oil 0.5%S สูงกว่าราคาน้ำมันดิบ และ HSFO เท่ากับ 110 และ 196 เหรียญสหรัฐต่อตันตามลำดับ (S&P Global Platts, 2018) ดังรูปที่ 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 63 ราคาน้ำมันดิบและราคาน้ำมันสำหรับเรือขนส่งปี ค.ศ. 2014-2018
(S&P Global Platts, 2018)

เนื่องจากราคา MLB20 ที่ผลิตได้ มีราคา 201.96 บาทต่อลิตร หรือเท่ากับ 183.97 บาทต่อกิโลกรัม (ความหนาแน่นจากตารางที่ 4.5 เท่ากับ 910.9 kg/m$^3$) หรือเท่ากับ 5,394 เหรียญสหรัฐต่อตัน จากข้อมูลราคาน้ำมันดังกล่าว สามารถคาดการณ์ได้ว่า ถ้าหากอนาคตราคาน้ำมันดิบมีค่าเท่ากับ 5,284 เหรียญสหรัฐต่อตัน หรือ 703 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล น้ำมัน MLB20 จากการศึกษานี้ จึงจะสามารถแข่งขันในเชิงพาณิชย์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 5.5 การศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ของ MLB20

### 5.5.1 การจัดตั้งบริษัท

การศึกษาการผลิต MLB20 ในเชิงพาณิชย์ จะเป็นการจัดตั้งบริษัท มารีน กรีน ออยล์ จำกัด (Marine Green Oil Co., Ltd.) สำหรับการสร้างโรงงานเพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ด้วยการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยจดจัดตั้งกับกรมพัฒนาธุรกิจการค้าในประเทศไทยด้วยทุนจดทะเบียน 50 ล้านบาท โดยสร้างโรงงานที่จังหวัดอยุธยา เพื่อประโยชน์ด้านการขนส่งและการจำหน่าย ซึ่งโรงงานต้องจดทะเบียนขอใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานลำดับที่ 106 กับกรมโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้

แล้ว หรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบ หรือผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม และจดทะเบียนขอใบอนุญาตเพื่อประกอบกิจการสถานที่เก็บรักษาน้ำมันเชื้อเพลิง ลักษณะที่สาม กับกรมธุรกิจพลังงาน เนื่องจากมีการจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณสูงกว่ากว่า 15,000 ลิตร แต่มีปริมาณรวมไม่เกิน 500,000 ลิตร

การดำเนินงานของบริษัท มารีน กรีน ออยล์ จำกัด จะแบ่งหน้าที่ความรับผิดชอบของบุคลากรเป็น 4 ฝ่าย ได้แก่

1) ฝ่ายวิจัยและพัฒนา (Research and Development Department) ประกอบด้วยหัวหน้าฝ่ายวิจัยและพัฒนา และเจ้าหน้าที่ในฝ่ายจำนวน 2 คน ทำหน้าที่วิจัยและพัฒนากระบวนการลดต้นทุนการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ และกระบวนการปรับปรุงพัฒนาคุณภาพของน้ำมันที่ได้จากการผสมให้มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังวิจัยถึงการนำผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่นๆ ที่ได้จากการผลิตน้ำมันผสมทั้ง 2 ชนิดมาพัฒนาเป็นนวัตกรรมเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม

2) ฝ่ายผลิต (Production Department) ประกอบด้วยหัวหน้าฝ่ายผลิต พนักงานปฏิบัติการเพาะเลี้ยง เก็บเกี่ยวสาหร่าย ผลิตน้ำมัน MPO ปรับปรุงคุณภาพ ULO ผสมน้ำมันและจัดเก็บ จำนวน 30 คน

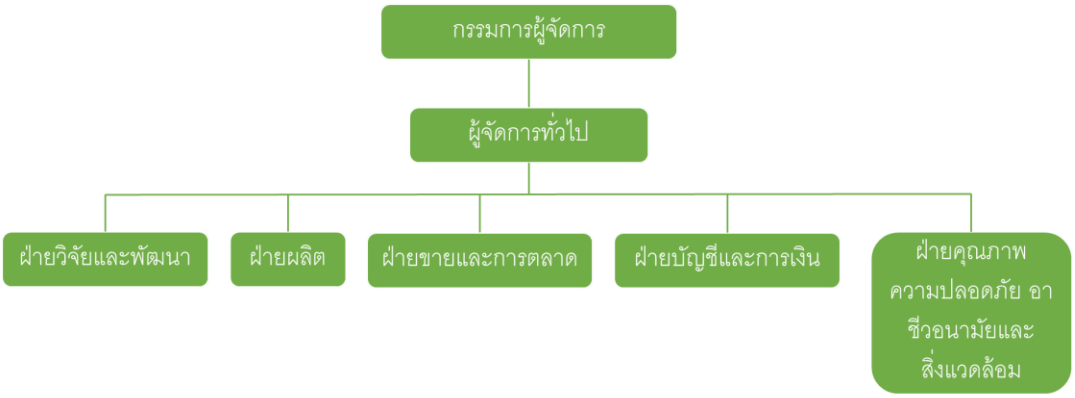
3) ฝ่ายขายและการตลาด (Sales and Marketing Department) ประกอบด้วยหัวหน้าฝ่ายขายและการตลาด พนักงานขายจำนวน 1 คน พนักงานการตลาด 1 คน และผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิค 1 คน ทำหน้าที่นำเสนอการจำหน่ายน้ำมันเตากำมะถันต่ำให้กับลูกค้า จัดจ้างเรือ Barge เพื่อส่งน้ำมันให้กับลูกค้า เป็นผู้ดูแลคลังที่เช่า และทำกิจกรรมการตลาดเพื่อส่งเสริมการขาย

4) ฝ่ายบัญชีและการเงิน (Accounting and Finance Department) ประกอบด้วยหัวหน้าฝ่ายบัญชีและการเงิน และพนักงานบัญชี 2 คน ทำหน้าที่รับจ่ายเงิน จัดทำบัญชีต้นทุน บัญชีขาย งบการเงิน การบริหารควบคุมและวางแผนทางการเงิน

5) ฝ่ายคุณภาพ ความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม (Quality Safety, Health and Environment Department) ประกอบด้วย หัวหน้าฝ่ายคุณภาพ ความปลอดภัย ชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม พนักงานควบคุมคุณภาพ 1 คน พนักงานด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม 1 คน

โดยมีโครงสร้างการบริหารงาน ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 64 โครงสร้างการบริหารงานของบริษัท มารีน กรีน ออยล์ จำกัด

5.5.2 การจัดการทรัพย์สินทางปัญญา

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการผสมระหว่างน้ำมัน 2 ชนิด โดยได้ผลการทดลองเป็นสูตรการผลิตที่ทำให้น้ำมันเตากำมะถันต่ำมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยที่ยังไม่มีการศึกษามาก่อนจากการตรวจสอบผ่านฐานข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ฐานข้อมูลสิทธิบัตร งานวิจัย วารสาร ข่าว และนิตยสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีคุณประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมการขนส่งทางเรือ และกระบวนการผลิตจากการผสมน้ำมันทั้ง 2 ประเภทนั้น อาจจะนำมาผ่านกระบวนการ Reverse engineering และผลิตลอกเลียนแบบได้ ดังนั้นการจัดการทรัพย์สินทางปัญญาของงานวิจัยฉบับนี้คือ การคุ้มครองสูตรการผลิตของน้ำมันผสมทั้ง 2 ชนิด ด้วยการนำไปจดอนุสิทธิบัตร (Petty Patent) ในประเทศไทย เพื่อคุ้มครองสิทธิในการผลิตและจัดจำหน่าย เจ้าของสิทธิคือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท มารีน กรีน ออยล์ จำกัด จะดำเนินการทำสัญญาการอนุญาตให้ใช้สิทธิเพื่อใช้ในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในรูปแบบของการให้ใช้สิทธิแต่เพียงผู้เดียว (Exclusive Licensing) ในการใช้สูตรการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำเพื่อประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.5.3 การวิเคราะห์ธุรกิจด้วย SWOT Analysis

ตารางที่ 36 การวิเคราะห์ SWOT ของผลิตภัณฑ์ MLB20

| **จุดแข็ง (Strengths)** | **จุดอ่อน (Weaknesses)** |
|---|---|
| 1) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการลดภาวะโลกร้อนและการลดปริมาณขยะอันตราย<br>2) สามารถผลิตได้โดยไม่จำกัดปริมาณและใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อย<br>3) มีปริมาณกำมะถันต่ำซึ่งผ่านเกณฑ์ของ IMO<br>4) เป็นน้ำมันที่สามารถผลิตได้ในประเทศ ลดการขาดดุลการค้า | 1) ต้นทุนการผลิตมีราคาสูงกว่าราคาตลาด ทำให้แข่งขันได้ยาก<br>2) คุณสมบัติบางชนิด ได้แก่ ปริมาณน้ำ ปริมาณขี้เถ้า และค่าความเป็นกรดยังไม่ผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217<br>3) ปริมาณผลผลิตที่ได้ของสาหร่ายแห้งยังอยู่ในระดับต่ำกว่า 1% |
| **โอกาส (Opportunities)** | **อุปสรรค (Threats)** |
| 1) ถ้าหากนำมาผลิตในระดับการผลิตเพื่อการค้า (Commercial scale) ต้นทุนการผลิตจะลดลงและมีโอกาสแข่งขันได้<br>2) ในกรณีที่ราคาเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีราคาสูงขึ้น เนื่องจากปัญหาอุปทานหรือความไม่เพียงพอของ Gas Oil อาจจะทำให้ MLB สามารถแข่งขันได้<br>3) ข้อกำหนดของ IMO หรือภาครัฐอาจจะทำให้ MLB20 มีข้อได้เปรียบในการแข่งขันในด้านความได้เปรียบเชิงสิ่งแวดล้อม | 1) ความไม่แน่นอนของประกาศของ IMO ด้านการควบคุมการใช้เชื้อเพลิงและระบบต่างๆ ในอนาคต<br>2) ปัญหาด้านการตัดสินใจในการลงทุนระบบและชนิดของเชื้อเพลิงในเรือขนส่งที่ยังไม่แน่นอน<br>3) ความแพร่หลายของระบบ Scrubber และระบบ LNG ในเรือขนส่งที่ทำให้ไม่มีการใช้เชื้อเพลิง LSFO<br>4) ราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกที่อยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากอุปทานน้ำมันดิบที่มีจากเทคโนโลยีการขุดเจาะน้ำมันดิบ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| 4) การเพิ่มเติมการปรับปรุงคุณภาพของ ULO จะทำให้คุณภาพของ MLB20 ที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์บางคุณสมบัติของ ISO 8217 ผ่านเกณฑ์ได้<br>5) ตลาดของเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งมีอัตราการเติบโตแบบก้าวกระโดด ด้วย CAGR 5.9% ในช่วงปัจจุบันถึงปี ค.ศ. 2023<br>6) โอกาสในการจำหน่ายคาร์บอนเครดิตในตลาดซื้อขายคาร์บอน เนื่องจากการเลี้ยงสาหร่ายลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก | และแก๊สธรรมชาติจากชั้นหินดินดาน (Shale oil & gas) |

5.5.4 การวิเคราะห์ปัจจัยภายนอกของธุรกิจด้วย PESTEL Analysis

1) ด้านการเมือง (Politics)

ความเปลี่ยนแปลงทางด้านการเมืองของโลกและนโยบายทางด้านการเมืองของแต่ละประเทศก็มีผลกระทบต่อราคาน้ำมันเป็นอย่างยิ่ง ดังจะเห็นได้จากในปัจจุบันที่ราคาน้ำมันพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากนโยบายการคว่ำบาตรของประเทศผู้นำเข้าน้ำมันรายใหญ่ต่อประเทศผู้ผลิตน้ำมัน และนโยบายกีดกันทางภาษีของสหรัฐเพื่อหวังผลทางการเมือง ซึ่งราคาน้ำมันที่พุ่งสูงขึ้นเรื่อยๆ มีผลดีต่อการทำธุรกิจของ MLB20

2) ด้านเศรษฐกิจ (Economics)

แนวโน้มการขยายตัวทางเศรษฐกิจและประชากรของโลกจะส่งผลดีต่อการผลักดัน MLB20 ให้ออกสู่เชิงพาณิชย์ เนื่องจากอุปสงค์ของการใช้เชื้อเพลิงจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ราคาเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น รวมถึงอัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี ที่ส่งผลกระทบต่อราคาค่าเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) ด้านสังคม (Social)

เนื่องจากในอนาคตมีแนวโน้มที่จะเป็นสังคมของผู้สูงอายุ (Aging Society) ที่มีความกังวลในด้านสุขภาพและคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น และความเจริญถูกขยายตัวไปทั่วไม่เฉพาะเมืองหลวงของในแต่ละประเทศ และมีความหวงแหนและมีความเป็นเจ้าของชุมชนที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้น ทำให้นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งที่สังคมและชุมชนมีความต้องการผลักดันให้เกิดการใช้งาน เพื่อลดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในชุมชน นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่าย ยังช่วยสร้างงานสร้างรายได้ให้กับชุมชนท้องถิ่นซึ่งสนับสนุนทิศทางของลักษณะสังคมและชุมชนในอนาคต

4) ด้านเทคโนโลยี (Technology)

เทคโนโลยีเพื่อใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำมีค่าการลงทุนที่ค่อนข้างสูง ไม่ว่าจะเป็นการลงทุนจากโรงกลั่นสำหรับ Desulfurization unit หรือ Coker unit หรือการลงทุนติดตั้งระบบ Scrubber หรือ LNG ในเรือขนส่ง ซึ่ง MLB20 ก็ยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูงกว่าราคาน้ำมันเตาที่มีในตลาดในปัจจุบัน แม้ว่าการใช้เชื้อเพลิง MLB20 จะทำให้ไม่ต้องมีการลงทุนเพิ่มเติมทั้งโรงกลั่นและเจ้าของเรือ เทคโนโลยีที่สามารถลดต้นทุนการผลิตสาหร่ายแห้งได้จะทำให้น้ำมัน MLB ที่ได้มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาข้อดีด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ของ MLB ซึ่งการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีจะทำให้การใช้ MLB20 มีความเป็นไปได้สูงในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) ด้านสิ่งแวดล้อม (Environment)

เนื่องจากประกาศของ IMO เรื่องการใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ หรือทิศทางของโลกที่ต้องการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก สะท้อนให้เห็นว่าองค์กรต่างๆ ในโลกต่างมีความกังวลเรื่องสิ่งแวดล้อม และอันตรายของมลภาวะที่มีต่อมนุษย์ ดังนั้น นวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมที่สามารถเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตเพื่อสิ่งแวดล้อมเป็นไปตามทิศทางและความต้องการของโลก ถ้าหากสามารถจัดการปัญหาเรื่องต้นทุนการผลิตจะทำให้ผลิตภัณฑ์นวัตกรรมที่ได้เป็นนวัตกรรมที่สำคัญยิ่งของโลก

6) ด้านกฎหมาย (Legal)

กฎระเบียบต่างๆ ที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มความเข้มงวดมากขึ้นเมื่อมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะสร้างความเปลี่ยนแปลงให้กับการผลิตเชื้อเพลิงและการ

ใช้เชื้อเพลิงเป็นอย่างยิ่งทั้งปัจจุบันและอนาคต ทิศทางเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน เป็นแนวทางที่สำคัญในการดำเนินธุรกิจของโรงกลั่นและผู้ประกอบการในอนาคต

5.5.5 การวิเคราะห์ธุรกิจโดย 5 Forces Model

1) การแข่งขันภายในอุตสาหกรรมเดียวกัน (Industrial Rivalry)

เนื่องจากน้ำมันเตาเป็นสินค้าโภคภัณฑ์ (Commodities) ซึ่งเป็นสินค้าที่มีมาตรฐานเดียวกันทั่วโลก ซึ่งราคาของน้ำมันเตาจะถูกกำหนดโดยอุปสงค์และอุปทานของตลาดโลก และมีการประกาศราคากลางการซื้อขายจากหลายแหล่งทั้งตะวันออกกลาง อเมริกา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นต้น

การแข่งขันในการจำหน่าย MLB20 จะอยู่ในตลาดเดียวกันกับน้ำมันเตากำมะถันต่ำประเภทเดียวกันกับ LSFO หรือ MGO ซึ่งราคาการจำหน่ายจะใกล้เคียงกับราคากลางที่ประกาศและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งในธุรกิจการซื้อขายน้ำมันมีผู้ขายปานกลางทั้งรายใหญ่และรายย่อย มีการแข่งขันสูงเป็นช่วงๆ ซึ่งจะเป็นช่วงที่อุปทานล้นตลาด ทำให้มีกำไรต่ำ แต่ยังมีช่วงที่สามารถทำกำไรสูงได้ในช่วงที่อุปทานต่ำ นอกจากนี้การให้บริการที่แตกต่างของผู้ขาย เช่น ความสะดวกของท่าเรือที่รับน้ำมัน การบริการส่งน้ำมันด้วยเรือขนส่งสินค้าชายฝั่ง (Barge) ชนิดของน้ำมันที่มีจำหน่ายในท่าเรือต่างๆ เหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้กับผู้ขาย

2) อำนาจต่อรองของผู้จัดหาวัตถุดิบ (Bargaining Power of Suppliers)

Supplier ในธุรกิจของ MLB20 คือ ผู้จำหน่ายน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากยานยนต์เท่านั้น ซึ่งก็คือศูนย์บริการรถยนต์ต่างๆ เนื่องจากธุรกิจ MLB20 จะเป็นผู้ผลิตสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตน้ำมันด้วยตัวเอง

น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากยานยนต์จากศูนย์บริการถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ซึ่งผู้ที่สามารถซื้อผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้อย่างถูกต้องตามกฎหมายต้องมีใบอนุญาตกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งในประเทศไทยมีน้อยราย โดยศูนย์บริการที่มีมาตรฐานต้องการขายหรือกำจัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากยานยนต์ตามราคาซื้อขายในตลาดโดยไม่หวังผลกำไร เนื่องจากไม่ใช่ผลิตภัณฑ์หลักที่จะสร้างผลกำไรให้กับศูนย์บริการ ดังนั้นอำนาจต่อรองของผู้จัดหาวัตถุดิบจึงมีค่อนข้างต่ำ เพราะต้องการกำจัดให้หมดไปด้วยวิธีที่ถูกต้องตามกฎหมาย

3) อำนาจต่อรองของลูกค้า (Bargaining Power of Customers)

ลูกค้ามีอำนาจในการต่อรองในระดับปานกลางถึงสูงสำหรับผลิตภัณฑ์น้ำมันเตากำมะถันต่ำ เนื่องจากสามารถเลือกใช้ LSFO, MGO เพื่อทดแทน MLB20 ได้ โดยที่มีคุณภาพ

เท่าเทียมกัน โดยการเลือกซื้อน้ำมันเตากำมะถันต่ำของลูกค้าโดยพื้นฐานเกิดจากราคาและการบริการ โดยในธุรกิจนี้มีผู้ขายปานกลาง ทั้งรายใหญ่และรายย่อย โดยลูกค้าสามารถเปลี่ยนไปซื้อกับผู้ขายรายอื่นๆ ได้โดยตลอดโดยที่ไม่มีความแตกต่างด้านคุณภาพของน้ำมัน เนื่องจากเป็นมาตรฐานเดียวกัน ปัจจัยหลักที่จะรักษาลูกค้าคือราคาที่แข่งขันได้และการบริการที่เหนือกว่า

4) ภัยคุกคามของสินค้าทดแทน (Threat of Substitute Products)

สินค้าทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ คือ การติดตั้งระบบ LNG เพื่อใช้เชื้อเพลิงเป็น LNG หรือการใช้ระบบ Scrubber ที่ใช้น้ำมันเตากำมะถันสูง แต่ระบบทั้ง 2 มีค่าลงทุนติดตั้งค่อนข้างสูง ซึ่งถือว่าภัยคุกคามจากสินค้าทดแทนน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ยังอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ

5) ภัยคุกคามจากผู้แข่งขันรายใหม่ (Threat of New Entrance)

ในตลาดน้ำมันเตากำมะถันต่ำ มีอุปสรรคในการเข้าสู่ตลาดระดับปานกลางสำหรับผู้แข่งขันรายใหม่ที่เป็นรายเล็กที่เรียกว่า ตัวแทนจำหน่าย (Jobber) โดยใช้เงินลงทุนไม่สูง เนื่องจากเป็นผู้ขายที่ทำธุรกิจในลักษณะซื้อมาขายไป แต่ปัญหาคือการควบคุมการจำหน่ายจากผู้ผลิตได้แก่ โรงกลั่นต่างๆ ในประเทศไทย ที่ปกติจะมีการจำหน่ายโดยตรงให้กับลูกค้าและมีผลกำไรที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากต้องซื้อต่อจากผู้ผลิตเพื่อนำไปจำหน่ายต่อ แต่ในส่วนของผู้แข่งขันรายใหม่ที่เป็นรายใหญ่จะมีโอกาสค่อนข้างต่ำมาก เนื่องจากต้องมีการลงทุนค่อนข้างสูงในการสร้างคลัง ท่าเรือ หรือโรงกลั่นเพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ดังนั้นถือได้ว่าเป็นธุรกิจที่มีภัยคุกคามจากผู้แข่งขันรายใหม่ค่อนข้างต่ำ

5.5.6 กลยุทธ์ทางการตลาด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.5.6.1 ส่วนประสมการตลาด (Marketing Mix 4Ps)

1) ผลิตภัณฑ์ (Product)

ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายของบริษัทฯ จะเป็นน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ที่ผลิตจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยที่กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย คือ เรือขนส่งต่างๆ ที่มีเส้นทางการเดินเรือเข้ามาในประเทศไทย โดยมีจุดเด่นคือเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม ที่มีปริมาณกำมะถันในน้ำมันไม่เกิน 0.5% ตามประกาศของ IMO นอกจากนี้ คุณภาพในด้านอื่นๆ ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน Residual marine fuels ของ ISO 8217

2) ราคา (Price)

ราคาจำหน่ายผลิตภัณฑ์เป็นราคาจำหน่ายน้ำมันเตากำมะถันต่ำที่อ้างอิงกับราคาของตลาดโลก โดยอ้างอิงจาก S&P Global Platts และเทียบเคียงกับราคาคู่แข่งในประเทศ

โดยวางกลยุทธ์การจำหน่ายด้วยราคาเทียบเท่ากับคู่แข่ง โดยไม่ทำลายราคาตลาด โดยราคาจำหน่ายมีส่วนลดให้กับลูกค้าที่มีปริมาณการซื้อสูง และมีส่วนลดให้กับลูกค้าที่ซื้อด้วยเงินสด และมีบริการการจำหน่ายด้วยราคาคงที่ (Fixed Price) ให้กับลูกค้า โดยการบริหารความเสี่ยงด้วยการทำ Price Hedging

3) ช่องทางการจำหน่าย (Place)

ในประเทศไทย มีท่าเรือขนส่งสินค้าของรัฐภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงคมนาคม ได้แก่ ท่าเรือกรุงเทพ ท่าเรือแหลมฉบัง ท่าเรือมาบตาพุด ท่าเรือน้ำลึกสงขลา ท่าเรือน้ำลึกภูเก็ต โดยในภาคกลางเรือขนส่งจะส่งสินค้ามายังท่าเรือกรุงเทพ (คลองเตย) และท่าเรือแหลมฉบังเป็นหลัก โดยการจำหน่ายน้ำมันของผู้ขายรายต่างๆ จะเป็นการเติมผ่านเรือ Barge ที่ไปส่งน้ำมันให้กับเรือที่ลอยกลางทะเลที่จุดทอดสมอใกล้กับท่าเรือต่างๆ

การจำหน่ายน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากบริษัทฯ จะทำโดยส่งน้ำมันทางรถจากโรงงานจังหวัดอยุธยาไปยังคลังน้ำมันริมทะเลที่บริษัทฯ เป็นผู้เช่า ได้แก่ คลังน้ำมันศรีราชา ของบริษัท ปตท. น้ำมันและการค้าปลีก จำกัด (มหาชน)

โดยบริษัทฯ จะทำการจัดจ้างเรือ Barge เพื่อบริการขนส่งน้ำมันเตากำมะถันต่ำไปเติมให้กับลูกค้า โดยมีเป้าหมายเป็นกลุ่มลูกค้าที่เป็นเรือคอนเทนเนอร์ที่มีค่อนข้างมากบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง

4) การส่งเสริมการจำหน่าย (Promotion)

การส่งเสริมการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ กับลูกค้าที่เป็นเจ้าของเรือขนส่ง ทำได้โดย

- การเข้าไปจำหน่ายโดยตรงผ่านวิศวกรฝ่ายขาย (Sales Engineer) ซึ่งเป็นพนักงานขายที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการใช้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเตากำมะถันต่ำ เพื่อสร้างความมั่นใจให้กับลูกค้า
- การให้บริการหลังการขายด้วยทีมเทคนิคที่มีความเชี่ยวชาญในด้านเครื่องยนต์ดีเซลและหม้อไอน้ำในเรือขนส่ง
- จัดงานสัมมนาให้ความรู้กับลูกค้า ในหัวข้อต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับทิศทางของเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง หรือความคืบหน้าจากประกาศต่างๆ ของ IMO
- การสร้างเว็ปไซต์ของบริษัทฯ ที่มีความน่าเชื่อถือ มีการให้ความรู้เกี่ยวกับเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำของบริษัทฯ มีข่าวสารใหม่ๆ แจ้งให้ลูกค้าทราบอย่างต่อเนื่อง และมีช่องทางการติดต่อที่ชัดเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

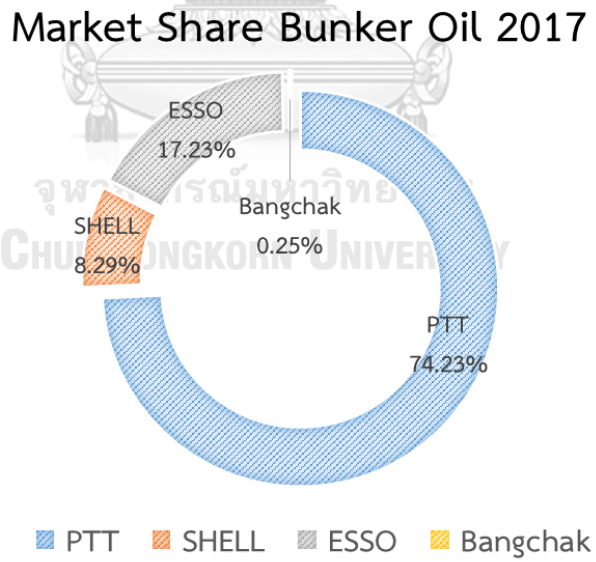
5.5.6.2 กลยุทธ์องค์กร

จากการวิเคราะห์ SWOT, PESTEL, 5 Forces พบว่ากลยุทธ์องค์กรเพื่อเพิ่มความสามารถในการจำหน่ายน้ำมันเตากำมะถันต่ำสำหรับกลุ่มลูกค้าเรือขนส่ง สามารถแบ่งเป็นกลยุทธ์ภายในและภายนอกองค์กรได้ ดังนี้

1) กลยุทธ์ภายใน มุ่งเน้นการสร้างผลการดำเนินงานที่มีคุณค่าด้านนวัตกรรมและเป็นองค์กรที่มีความพร้อมต่อการเปลี่ยนแปลงของเศรษฐกิจและเทคโนโลยีของโลก
2) กลยุทธ์ภายนอก มุ่งเน้นการบริหารลูกค้าสัมพันธ์ (Customer Relationship Management) จากการจำแนกประเภทของลูกค้า (Client Classifying) และการหาพันธมิตรร่วมธุรกิจที่มีจุดแข็งที่แตกต่างจากบริษัทฯ ได้แก่ พันธมิตรที่มีคลังน้ำมัน เรือ Barge หรือเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่สามารถต่อยอดนวัตกรรมของบริษัทฯ ได้

5.5.7 ภาพรวมของตลาดน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งในประเทศไทย

ปริมาณการใช้น้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งในประเทศไทยมีกว่า 1,100 ล้านลิตรต่อปี (ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน) มีมูลค่าตลาดสูงกว่า 12,000 ล้านบาทต่อปี โดยส่วนแบ่งทางการตลาดในปี พ.ศ. 2560 ของน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งของผู้ค้าน้ำมันรายใหญ่ในประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 65




รูปที่ 65 ส่วนแบ่งการตลาดของน้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งของผู้ค้าน้ำมันรายใหญ่ในประเทศไทย (ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน)

น้ำมันเตาสำหรับเรือขนส่งที่จำหน่ายในประเทศไทยในปัจจุบันแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ Marine Fuel Oil 180 cSt มีปริมาณกำมะถัน 3% และ Marine Fuel Oil 380 cSt มีปริมาณกำมะถัน

3.5% ที่มีปริมาณการใช้สูงกว่า โดยเรือขนส่งแบ่งตามประเภทที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ เรือสินค้าเทกอง (Bulk Carrier) เรือคอนเทนเนอร์ (Container Ship) และเรือบรรทุกสินค้าเหลว (Tanker)

จำนวนลูกค้าโดยรวมทั้งลูกค้าในและต่างประเทศประมาณ 150 ราย โดยมีรายชื่อลูกค้ารายใหญ่ๆ ได้แก่ RCL Feeder Pte Ltd, Wan Hai Lines Ltd, TOYOTA TSUSHO, MINERVA BUNKERS Pte, SEA OIL OFFSHORE Ltd และ Pacific International มีปริมาณการจำหน่ายต่อครั้งค่อนข้างสูง อยู่ในช่วง 50,000-1,200,000 ลิตร

5.5.8 การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ (Project Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนผลิต MLB20 เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์นี้มีสมมติฐาน ดังนี้

1) น้ำมัน MLB20 ที่ได้จากกระบวนการผลิตผ่านข้อกำหนดทุกประการของ ISO 8217
2) ราคาจำหน่ายของ MLB20 คิดเทียบเท่ากับราคาจำหน่ายของ LSFO ในปัจจุบันคือ 26.94 บาทต่อลิตร
3) เนื่องจากตลาดของ HSFO ในประเทศไทยในปัจจุบัน คือ 100 ล้านลิตรต่อเดือน ซึ่งคาดการณ์ว่าปริมาณการใช้ LSFO ในประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ. 2020 ยังมีค่าใกล้เคียงปริมาณดังกล่าว ซึ่งคาดการณ์ว่าจะสามารถจำหน่ายน้ำมัน MLB20 ได้เดือนละ 1 แสนลิตรต่อเดือน คิดเป็น 0.1% ของตลาด
4) ยอดขายของ MLB20 ขยายเพิ่มขึ้นปีละ 5% และราคาขายเพิ่มขึ้นปีละ 5% จากอัตราเงินเฟ้อและนโยบายของบริษัทในการผลักดันราคาจำหน่าย
5) ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉลี่ย 5% ต่อปี
6) ค่าเช่าคลังคิดราคาเทียบเท่ากับการเช่าคลังน้ำมันเฉลี่ยที่ 0.40 บาท/ลิตร สำหรับการเช่าถังน้ำมันขนาด 200,000 ลิตร ณ คลังน้ำมันศรีราชา
7) ค่าขนส่งน้ำมันสำหรับรถขนาด 30,000 ลิตร จากอยุธยามายังคลังน้ำมันศรีราชาเฉลี่ยเท่ากับ 0.30 บาทต่อลิตร สำหรับราคาน้ำมันดีเซลในช่วง 25-30 บาทต่อลิตร
8) ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge จากคลังน้ำมันศรีราชาไปยังจุดทอดสมอเรือเท่ากับ 8 เหรียญสหรัฐต่อตัน สำหรับปริมาณจัดส่ง 100,000 ลิตรต่อครั้ง
9) พื้นที่เพาะปลูกสาหร่าย 1 เอเคอร์ หรือเท่ากับ 4,046 ตารางเมตร สามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 60 ตันต่อปี (Singh, Jha, Bansal, & Pal Singh, 2011) และราคาจำหน่ายคาร์บอนเครดิตในเดือนมิถุนายน 2561 เท่ากับ 565 บาท/ตัน (ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2561)
10) อัตราภาษี (Tax) 20% ของกำไรสุทธิ (ที่มา: กรมสรรพากร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

11) ต้นทุนทางการเงินเฉลี่ย (Weighted Average Cost of Capital, WACC) 12% โดยเป็นต้นทุนจากการกู้ยืมและต้นทุนส่วนของผู้ถือหุ้น

12) ค่าเสื่อมราคา (Depreciation) ของสินทรัพย์ต่างๆ มีดังนี้

a. อาคารสำนักงาน 20 ปี
b. โรงงาน 20 ปี
c. เครื่องจักรในโรงงาน 5 ปี

การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาต้นทุนการผลิต MLB20 ในงานวิจัยนี้ ดังนี้

1) สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ผลผลิต 0.05% (น้ำสาหร่าย 1 ลิตร ได้สาหร่ายแห้ง 0.5 กรัม) และเก็บเกี่ยวได้ทุกๆ 7 วัน โดยใน 1 เดือนมีการเก็บเกี่ยวเฉลี่ย 4 ครั้ง
2) ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กได้ส่วนที่เป็นน้ำมัน 18.65%
3) ต้นทุนทางตรงของการผลิต MLB20 จากการศึกษาได้เท่ากับ 201.96 บาท/ลิตร

ค่าลงทุนเริ่มต้น (Initial investment) ในการผลิต MLB20 แสดงดังในตารางที่ 37

ตารางที่ 37 รายละเอียดค่าลงทุน (Initial investment) ในการผลิต MLB20

| **รายละเอียดการลงทุน** | **ขนาด** | **จำนวน** | **เงินลงทุน** |
|---|---|---|---|
| ค่าที่ดิน[ก] | 300 ไร่ | 1 แปลง | 300 ล้านบาท |
| ค่าก่อสร้างอาคารสำนักงาน[ข] | พื้นที่ใช้สอย 400 ตร.ม. | 1 หลัง 2 ชั้น | 7 ล้านบาท |
| ค่าก่อสร้างอาคารโรงงาน[ข] | 2 ไร่ | 2 หลัง | 16 ล้านบาท |
| ค่าถังเก็บ ULO (ถังนอน) | 100,000 ลิตร | 2 ใบ | 1 ล้านบาท |
| ค่าถังเก็บ MPO (ถังนอน) | 20,000 ลิตร | 2 ใบ | 0.2 ล้านบาท |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | |
|---|---|---|---|
| ค่าถังเก็บ MLB (ถังนอน) | 50,000 ลิตร | 4 ใบ | 1 ล้านบาท |
| บ่อเลี้ยงสาหร่าย 40,000 ลิตร | 4x20 ตร.ม. ลึก 50 เซนติเมตร | 5,650 บ่อ | 1,130 ล้านบาท |
| เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส[ค] | 10 ตัน/วัน | 2 เครื่อง | 10 ล้านบาท |
| เครื่องอบแห้งด้วยความร้อน Spray Dryer[ค] | 500 ลิตร/ชั่วโมง | 12 เครื่อง | 48 ล้านบาท |
| เครื่องบดเป็นผง[ค] | 40 แรงม้า 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง | 6 เครื่อง | 2.4 ล้านบาท |
| รวมค่าลงทุนเริ่มต้น | | | 1,515.60 ล้านบาท |

[ก] จากราคาประเมินทุนทรัพย์ที่ดิน สำนักประเมินราคาทรัพย์สิน กรมธนารักษ์

[ข] จากราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2561 โดยมูลนิธิประมูลค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย

[ค] ราคาสำรวจจากบริษัทผู้ขายในภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ บริษัท โอซิริส เอ็นเนอร์จี จำกัด, บริษัท ไทยอาซาโก้ จำกัด บริษัท นาถพัฒน์ จำกัด Jiangyin Top International Trade Co., Ltd. และบริษัท เอชวีเอซีเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1) ต้นทุนทางอ้อม หรือค่าโสหุ้ยการผลิต (Overhead cost) ในการผลิต MLB เป็นค่าโดยประมาณจากธุรกิจใกล้เคียงจากการสอบถามเก็บข้อมูล แสดงดังในตารางที่ 38

ตารางที่ 38 ค่าโสหุ้ยการผลิต (Overhead cost) ในการผลิต MLB

| **ต้นทุน** | **รายละเอียด** | **รวมต้นทุนต่อเดือน (บาท)** | **รวมต้นทุนต่อปี (บาท)** |
|---|---|---|---|
| เงินเดือนและสวัสดิการพนักงาน | เงินเดือนและสวัสดิการของพนักงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการผลิต | 640,000 | 7,680,000 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก) | | | |
| ค่าสาธารณูปโภคอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับต้นทุนทางตรง | ค่าน้ำ ค่าไฟ ของสำนักงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับต้นทุนทางตรงในการผลิต | 100,000 | 1,200,000 |
| ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องจักร | ค่าอะไหล่ ค่าแรงในการซ่อมแซมบำรุงรักษา | 50,000 | 600,000 |
| ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด | ค่าอุปกรณ์สำนักงาน เครื่องมือ วัสดุในโรงงาน ค่าเดินทางและค่าพาหนะ | 100,000 | 1,200,000 |
| ค่าการส่งเสริมการจำหน่าย | ค่ากิจกรรมการตลาด ค่าจัดประชุมสัมมนาลูกค้า ฯลฯ | 100,000 | 1,200,000 |
| รวมค่าใช้จ่ายในการผลิต (Overhead cost) | | | 11,880,000 |

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการในระยะเวลา 20 ปี ตามสมมติฐานดังที่ได้กล่าวมา พบว่าโครงการลงทุนผลิต MLB20 มีผลตอบแทนการลงทุน (IRR) มีค่าเป็นลบ มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นลบ แสดงในตารางที่ 39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 39 Project feasibility study

| ปีที่ | ค่าลงทุน (ล้านบาท) | รายได้ (ล้านบาท) | ต้นทุน (ล้านบาท) | EBITDA (ล้านบาท) | ค่าเสื่อมราคา (ล้านบาท) | EBIT (ล้านบาท) | ภาษี (ล้านบาท) | Net Operating Profit (ล้านบาท) | Net Cash Flows (ล้านบาท) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | -1,515.60 | | | | | | | | -1515.60 |
| 1 | | 34.14 | 255.38 | - 221.24 | 70.17 | -291.41 | - | -291.41 | - 221.24 |
| 2 | | 37.61 | 280.88 | - 243.27 | 70.17 | -313.44 | - | -313.44 | - 243.27 |
| 3 | | 41.42 | 308.95 | - 267.53 | 70.17 | -337.70 | - | -337.70 | - 267.53 |
| 4 | | 45.61 | 339.86 | - 294.26 | 70.17 | -364.43 | - | -364.43 | - 294.26 |
| 5 | | 50.21 | 373.90 | - 323.69 | 70.17 | - 393.86 | - | - 393.86 | - 323.69 |
| 6 | | 55.28 | 411.40 | - 356.12 | 57.65 | - 413.77 | - | - 413.77 | - 356.12 |
| 7 | | 60.85 | 452.69 | - 391.85 | 57.65 | - 449.50 | - | - 449.50 | - 391.85 |
| 8 | | 66.98 | 498.18 | - 431.20 | 57.65 | - 488.85 | - | - 488.85 | - 431.20 |
| 9 | | 73.72 | 548.28 | - 474.55 | 57.65 | - 532.20 | - | - 532.20 | - 474.55 |
| 10 | | 81.15 | 603.47 | - 522.32 | 57.65 | - 579.97 | - | - 579.97 | - 522.32 |
| 11 | | 89.32 | 664.26 | - 574.94 | 57.65 | - 632.59 | - | - 632.59 | - 574.94 |
| 12 | | 98.32 | 731.23 | - 632.91 | 57.65 | - 690.56 | - | - 690.56 | - 632.91 |
| 13 | | 108.23 | 805.01 | - 696.78 | 57.65 | - 754.43 | - | - 754.43 | - 696.78 |
| 14 | | 119.15 | 886.30 | - 767.15 | 57.65 | - 824.80 | - | - 824.80 | - 767.15 |
| 15 | | 131.17 | 975.85 | - 844.68 | 57.65 | - 902.33 | - | - 902.33 | - 844.68 |
| 16 | | 144.41 | 1,074.52 | - 930.11 | 57.65 | - 987.76 | - | - 987.76 | - 930.11 |
| 17 | | 158.99 | 1,183.24 | -1,024.25 | 57.65 | -1,081.90 | - | -1,081.90 | -1,024.25 |
| 18 | | 175.06 | 1,303.03 | -1,127.97 | 57.65 | -1,185.62 | - | -1,185.62 | -1,127.97 |
| 19 | | 192.76 | 1,435.02 | -1,242.26 | 57.65 | -1,299.91 | - | -1,299.91 | -1,242.26 |
| 20 | | 212.28 | 1,580.46 | -1,368.19 | 57.65 | -1,425.84 | - | -1,425.84 | -1,368.19 |
| | | | | | | | | IRR (%) | - |
| | | | | | | | | NPV | -4871.66 |
| | | | | | | | | WACC | 12% |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.5.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis)

จากผลการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการพบว่าตัวแปรที่ทำให้โครงการไม่ผ่านการศึกษาความเป็นไปทางการเงินคือ ค่าลงทุน ต้นทุนการผลิตทางตรงและราคาขาย ดังนั้นจึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของทั้ง 3 ตัวแปรดังกล่าว โดยมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1) ศึกษา 2 ตัวแปรด้านต้นทุนร่วมกัน ได้แก่ ค่าลงทุน เปลี่ยนแปลงในช่วง 10-40% จากค่าลงทุนในปัจจุบัน และต้นทุนการผลิตทางตรง เปลี่ยนแปลงในช่วง 3-10% จากต้นทุนการผลิตในปัจจุบัน สามารถศึกษาความอ่อนไหวของโครงการได้ดังตารางที่ 40-42

ตารางที่ 40 การวิเคราะห์ IRR ในการศึกษาความอ่อนไหวของค่าลงทุนและต้นทุนการผลิตทางตรงของ MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ

| **การวิเคราะห์ IRR** | | **% ของต้นทุนการผลิตทางตรงจากปัจจุบัน** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **3%** | **5%** | **7%** | **10%** |
| % ของการลงทุนเริ่มต้น | 10% | 19% | 15% | 10% | -1% |
| | 20% | 11% | 8% | 4% | -5% |
| | 30% | 7% | 4% | 1% | -7% |
| | 40% | 4% | 2% | -1% | -9% |

ตารางที่ 41 การวิเคราะห์ NPV ในการศึกษาความอ่อนไหวของค่าลงทุนและต้นทุนการผลิตทางตรงของ MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ

| **การวิเคราะห์ NPV** | | **% ของต้นทุนการผลิตทางตรงจากปัจจุบัน** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **3%** | **5%** | **7%** | **10%** |
| % ของการลงทุนเริ่มต้น | 10% | 114.23 | 44.03 | -28.21 | -140.25 |
| | 20% | -37.33 | -107.53 | -179.77 | -291.61 |
| | 30% | -188.89 | -259.09 | -331.33 | -443.17 |
| | 40% | -340.45 | -410.65 | -482.89 | -594.73 |

ตารางที่ 42 การวิเคราะห์ Payback ในการศึกษาความอ่อนไหวของค่าลงทุนและต้นทุนการผลิตทางตรงของ MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ

| การวิเคราะห์ Payback | | % ของต้นทุนการผลิตทางตรงจากปัจจุบัน | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 3% | 5% | 7% | 10% |
| % ของการลงทุนเริ่มต้น | 10% | 7.06 | 8.85 | 11.72 | > 20 ปี |
| | 20% | 10.77 | 12.85 | 15.93 | > 20 ปี |
| | 30% | 13.37 | 15.56 | 18.69 | > 20 ปี |
| | 40% | 15.46 | 17.70 | > 20 ปี | > 20 ปี |

2) ศึกษาตัวแปรราคาจำหน่าย เปลี่ยนแปลงในช่วง 290-320 บาทต่อลิตร สามารถศึกษาความอ่อนไหวของโครงการได้ดังตารางที่ 43

ตารางที่ 43 การศึกษาความอ่อนไหวของราคาขายน้ำมัน MLB20 ต่อความเป็นไปได้ของโครงการ

| การวิเคราะห์ | ราคาขายน้ำมัน MLB20 (บาท/ลิตร) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 290 | 300 | 310 | 320 |
| IRR | 10% | 12% | 13% | 14% |
| NPV | -210.3 | -62.09 | 86.13 | 234.35 |
| Payback | 10.63 | 9.93 | 9.31 | 8.78 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการให้โครงการผลิต MLB20 มีความเป็นไปได้ทางด้านการเงินเพื่อการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ สามารถทำได้ 2 กรณี คือ

1) ต้องมีเทคโนโลยีที่สามารถลดต้นทุนการผลิต MLB20 ให้ได้อย่างน้อยต่ำกว่า 5% (10.10 บาท/ลิตร) ของต้นทุนการผลิต MLB20 ที่ได้จากการศึกษานี้ และต้องสามารถลดค่าลงทุนเริ่มต้นให้ไม่เกิน 10% (151.60 ล้านบาท) ของการลงทุนการผลิต MLB20 ที่ได้จากการศึกษานี้

2) ต้องสามารถจำหน่าย MLB20 ให้ได้ราคาสูงกว่า 310 บาท/ลิตร โดยขึ้นกับภาวะราคาน้ำมันในตลาดโลก อุปสงค์และอุปทานของน้ำมันเตากำมะถันต่ำในขณะนั้น

5.5.10 ข้อเสนอแนะการดำเนินการในเชิงพาณิชย์

จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านการเงินของโครงการผลิต MLB20 พบว่าด้วยต้นทุนและราคาจำหน่ายของ MLB20 ในปัจจุบัน ยังไม่สามารถดำเนินการได้ในเชิงพาณิชย์ ผู้วิจัยจึงได้ให้ข้อเสนอแนะการดำเนินการเพื่อให้มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ดังนี้

1. เปลี่ยนวัตถุดิบจากสาหร่ายสไปรูลิน่า เป็นสาหร่ายขนาดใหญ่ที่มีต้นทุนต่ำ หรือชีวมวลอื่นๆ ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ และนำมาทดลองผสมกับ ULO และทดสอบคุณสมบัติ เพื่อผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ โดยผู้วิจัยสรุปการศึกษาทั้งผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและราคาต้นทุนของชีวมวลต่างๆ จากวรรณกรรม แสดงดังในตารางที่ 44

ตารางที่ 44 ผลผลิตของกระบวนการไพโรไลซิสและราคาต้นทุนของชีวมวลต่างๆ ที่อาจนำมาใช้แทนสาหร่ายสไปรูลิน่า

| Type of biomass | Liquid Yield of Pyrolysis (%) | Cost of dry biomass (Baht/kg) | Reference |
|---|---|---|---|
| Waste Glycerol | 42 | 2 | (Leong, Lam, Ani, Ng, & Chong, 2016) |
| Hydrilla verticillata | 41.25 | 30 | (Promdee, Phihusut, Monthienvichienchai, Tongaram, & Khongsuk, 2018) |
| Wild Cyanophyta | 66 | 5 | (J. Chen, Ci, Lai Wei, Min Yu, & Jin, 2015) |
| Water Hyacinth | 56 | 18 | (Jiu, Li, & Yu, 2015) |

2. การเปลี่ยนกระบวนการไพโรไลซิสจากเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในห้องทดลอง เป็นเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่ใช้พลังงานจากฟืน แก๊ส LPG หรือน้ำมันไพโรไลซิสเอง ทำให้ต้นทุนการไพโรไลซิสลดลงได้ต่ำสุดถึง 0.30 บาท/กิโลกรัมสาหร่ายแห้ง (ข้อมูลจากบริษัท โอซิริส เอ็นเนอร์จี จำกัด และบริษัท พระลาน เอนเนอร์ยี่ จำกัด)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. เมื่อคำนวณต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากสมการในข้อ 3.3 จากข้อมูลด้านบน พบว่าต้นทุนในของน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลเมื่อมีการเปลี่ยนวัตถุดิบโดยประมาณ แสดงในตารางที่ 45

ตารางที่ 45 ประมาณการต้นทุนน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลประเภทอื่นๆ ที่อาจนำมาใช้ทดแทนสาหร่ายสไปรูลิน่า

| Type of biomass | Calculation cost of pyrolysis oil | Estimated Cost of Biomass Pyrolysis Oil (Baht/liter) |
|---|---|---|
| Waste Glycerol | (2+0.30)/0.42 | 5.48 |
| Ceratophyllum demersum | (30+0.30)/0.4125 | 73.45 |
| Wild Cyanophyta | (5+0.30)/0.66 | 8.03 |
| Water Hyacinth | (18+0.30)/0.56 | 32.68 |

4. กล่าวโดยสรุป บริษัทฯ สามารถศึกษาการใช้ชีวมวลประเภทอื่นๆ หรือสาหร่ายขนาดเล็กประเภทอื่นที่มีต้นทุนต่ำ เพื่อใช้ทดแทนสาหร่ายสไปรูลิน่าในการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำด้วยกระบวนการผลิตจากการศึกษานี้ และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 6
# บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปและอภิปรายผล

การสรุปและอภิปรายผลเทียบจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนี้

**วัตถุประสงค์ที่ 1.** *เพื่อศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กกับน้ำมันเครื่องใช้แล้ว*

- พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายสไปรูลิน่าผ่านเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง ขนาด 3 ลิตร ได้ผลลัพธ์เป็นของแข็ง 33.97% แก๊ส 24.66% และของเหลว 41.37% โดยของเหลวสามารถแยกได้ด้วยกรวยแยกสาร และได้ส่วนที่เป็น Oil phase 45.09% และ Aqueous phase 54.91% ซึ่งเมื่อคำนวณโดยรวมแล้ว ได้ผลผลิตที่เป็นน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายสไปรูลิน่า 18.65%
- เนื่องจากการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กยังมีประเด็นปัญหาหลัก 2 ด้าน ได้แก่ คุณภาพและต้นทุนการผลิต โดยน้ำมันไพโรไลซิสมีความหนืดสูง ความชื้นสูง มีปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนสูง มีความเป็นกรดสูง มีการให้ความร้อนที่ไม่คงที่ และมีต้นทุนการผลิตสูง วิธีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การนำมาผสม (Blending) ด้วยน้ำมันที่เข้ากันได้ มีต้นทุนต่ำ และทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายมีคุณสมบัติที่ดีอย่างหนึ่ง คือเป็นน้ำมันที่ปริมาณกำมะถันต่ำ
- การคัดเลือกน้ำมันที่ผสม MPO คัดเลือกจากเกณฑ์ค่าความร้อน การผสมเข้ากันได้ ต้นทุน และความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (ULO) เป็นน้ำมันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดในการนำมาผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำในเชิงพาณิชย์
- น้ำมัน MPO และ ULO มีความเข้ากันได้ดีในระดับหนึ่ง เมื่อมองด้วยตาไม่เห็นการแยกชั้น แม้ว่าจะตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน แต่เมื่อทดสอบด้วย Cleanliness and Compatibility of Residual Fuels by Spot Test ยังพบว่าน้ำมันทั้ง 2 ชนิดมีความเข้ากันได้ในระดับปานกลาง โดยน้ำมันที่ผสมได้อาจจะเกิดกากตะกอนบางส่วน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**วัตถุประสงค์ที่ 2.** *เพื่อศึกษาคุณสมบัติตามมาตรฐาน ISO 8217 Residual marine fuels และต้นทุนการผลิตของน้ำมันเตากำมะถันต่ำที่ผลิตได้จากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันเครื่องใช้แล้ว*

- การทดสอบการผสมกันระหว่าง MPO และ ULO ในอัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าน้ำมันผสม MPO 20% และ ULO 80% หรือ MLB20 เป็นสัดส่วนผสมน้ำมันทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 เกือบทั้งหมด ยกเว้น Ash, Water content, Total acid number ซึ่งการพิจารณาการปรับปรุงคุณภาพของ MPO ในด้านการลดปริมาณน้ำและความเป็นกรด และการปรับปรุงคุณภาพของ ULO ในด้านการลดปริมาณขี้เถ้า จะทำให้น้ำมันผสม MLB20 ที่ได้มีความเหมาะสมในด้านคุณสมบัติที่จะจำหน่ายเพื่อทดแทน LSFO
- การลดปริมาณน้ำในน้ำมันอาจทำได้ด้วยเทคนิคการลดปริมาณน้ำจากน้ำมันต่างๆ เช่น Hydrogel adsorbents (Fregolente et al., 2015) หรือ Azeotropic water removal โดยใช้ n-butanol และ 2-methylfuran (Lu et al., 2017) การลดความเป็นกรดในน้ำมัน MPO อาจทำได้โดยการกลั่นแบบมีปฏิกิริยา (Reactive distillation) ด้วยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล และเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดซัลฟิวริค (Wisniewski Jr et al., 2015) การลดปริมาณขี้เถ้าใน ULO อาจทำได้โดย solvent extraction และ agitated thin film evaporation (Manyuchi & Nengiwa, 2015)
- ค่าความร้อนของ ULO ใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ส่วน MPO มีค่าความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากมีองค์ประกอบที่เป็นออกซิเจนและความชื้นสูงกว่า การย่อยสลายทางความร้อนของ MPO เกิดขึ้นเร็วกว่าเนื่องจากประกอบไปด้วยสารระเหย (Volatiles) สูงกว่า และ MPO มีองค์ประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนที่เบาระหว่าง C5-C15 ค่อนข้างสูง (18%) ในขณะที่ ULO มีเพียง 14%
- ต้นทุนของ MPO ($C_{MPO}$) ประกอบไปด้วยต้นทุนสาหร่ายแห้ง ($C_{DM}$) เท่ากับ 174.32 บาทต่อกิโลกรัม จากการสัมภาษณ์และเก็บข้อมูลจากฟาร์มสาหร่ายนาทอง และต้นทุนกระบวนการไพโรไลซิส ($C_P$) เท่ากับ 20.49 บาทต่อกิโลกรัม จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เมื่อคำนวณต้นทุนรวมและผลผลิตของน้ำมันที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายจำนวน 18.65% แล้ว พบว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ต้นทุน MPO ($C_{MPO}$) เท่ากับ 976.59 บาทต่อลิตร ซึ่งเมื่อแยกต้นทุนตามรายละเอียดของต้นทุนการผลิต MPO แล้ว พบว่าต้นทุนค่าสารอาหาร (Nutrients) มีค่าสูงที่สุด (70.84%)

- ต้นทุนของ ULO ($C_{ULO}$) เท่ากับ 8.30 บาทต่อลิตร จากการศึกษาต้นทุนของโรงปรับปรุงคุณภาพจากบริษัท วังจุฬา ดีเวลลอปเมนท์ (2004) จำกัด บริษัท เอนเนอร์จี อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด และ บริษัท มหาชัย เอกศิริออยล์ จำกัด ซึ่งประกอบไปด้วยต้นทุนที่ซื้อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากศูนย์บริการรถยนต์ที่มีมาตรฐาน และต้นทุนจากการนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพในโรงงาน
- เมื่อศึกษาต้นทุนของน้ำมันผสมทั้งหมดในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าต้นทุนของ MLB100, MLB80, MLB50, MLB20, MLB0 เท่ากับ 976.59, 782.93, 492.45, 201.96, 8.30 บาทต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งพบว่า MLB20 ที่มีโอกาสในเชิงพาณิชย์มากที่สุด ยังมีราคาสูงกว่าราคา LSFO ในปัจจุบันถึง 175.02 บาทต่อลิตร ซึ่งการพิจารณาลดต้นทุนของ MPO เป็นสิ่งที่สำคัญที่จะทำให้น้ำมัน MLB สามารถแข่งขันได้ในตลาด โดยมี 2 ปัจจัยหลัก คือ การเพิ่มผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ ($Y_{MPO}$) และการลดต้นทุนของสาหร่ายแห้งแบบผง ($C_{DM}$) นอกจากนี้ถ้าหากมีการสนับสนุนจากภาครัฐในด้านการเงิน (Government subsidies) สำหรับการผลิตน้ำมันที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่มีการลดขยะอันตราย ลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ลดการปลดปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเป็นการสนับสนุนการผลิตน้ำมันที่มาจากแหล่งชีวมวลในประเทศ จะทำให้การผลิตน้ำมัน MLB มีความเป็นไปได้มากขึ้นในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**วัตถุประสงค์ที่ 3.** *เพื่อศึกษาแนวทางการนำนวัตกรรมการผลิตที่ได้ไปสู่ธุรกิจในเชิงพาณิชย์*

- ตลาดของเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่งมีการเติบโตสูงขึ้นทุกๆปีตาม GDP ของโลกที่คาดว่าจะเติบโตเป็น 2 เท่าในปี ค.ศ. 2040 โดยปัจจุบันมีการใช้เชื้อเพลิง HSFO เป็นหลักสูงถึง 68.7% และตลาดที่ใหญ่ที่สุดของโลกอยู่ที่ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิค 43%
- ข้อมูลจากสำนักวิเคราะห์ต่างๆ สรุปมีการคาดการณ์ได้ 2 แนวทางเมื่อ IMO ประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ คือ

- เรือขนส่งจะมีการติดตั้งระบบ Scrubber เพิ่มมากขึ้น โดยช่วงแรกหลังจากประกาศใช้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ จะทำให้การใช้ MGO เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและในช่วงหลังจากนั้น ปริมาณการใช้ HSFO จะเพิ่มขึ้นทดแทนเนื่องจากคาดว่าเรือขนส่งจะทยอยติดตั้งระบบ Scrubber เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความคุ้มค่าในการลงทุนจากราคาที่แตกต่างกันของ MGO และ HSFO
- เรือจะไม่มีการติดตั้งระบบ Scrubber และผู้ผลิตต้องผลิตเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำ ได้แก่ MGO หรือ LSFO เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเรือขนส่ง โรงกลั่นปิโตรเลียมอาจพิจารณาการผลิต MGO เพิ่มเติมด้วยการติดตั้ง Coker unit เพื่อทำให้สามารถผลิต MGO ได้เพิ่มขึ้น หรือผลิตน้ำมัน LSFO ที่เกิดจากการผสม Gas oil กับ HSFO โดยเมื่อพิจารณาผลตอบแทนการลงทุนในช่วง 9-25%
- โดยสรุปในขณะนี้ยังไม่มีความชัดเจนในการตัดสินใจในการลงทุน ทั้งโรงกลั่นและเจ้าของเรือขนส่ง ความแตกต่างระหว่างราคา MGO และ HSFO มีผลต่อการพิจารณาลงทุนของทั้งเรือขนส่งและโรงกลั่น นอกจากนี้ยังเกิดความวิตกกังวลและความไม่มั่นใจในนโยบายและกฎระเบียบที่จะออกมาจาก IMO ในอนาคต

- จากทิศทางพลังงานของโลก พบว่าโลกมีความต้องการเป็นอย่างยิ่งที่จะลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$ emission) ที่เป็นก๊าซเรือนกระจก จากความตกลงปารีส (Paris Agreement) ในปี ค.ศ. 2015 ซึ่งทิศทางเชื้อเพลิงแห่งอนาคต คือ พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) หรือก๊าซธรรมชาติ ที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ ซึ่งการผลิตเชื้อเพลิงจากสาหร่ายขนาดเล็กที่ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมที่สนองความต้องการของโลก
- จากการศึกษาผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากประกาศของ IMO พบว่า
  - ผู้ผลิต พิจารณา 2 ทางเลือกในการผลิตคือ การผลิต LSFO จากการใช้ Sweet crude หรือ การลงทุนเพิ่มการผลิต MGO เพื่อตอบสนองความต้องการจากประกาศของ IMO แต่ยังมีความไม่มั่นใจในการลงทุนเนื่องจากยังไม่แน่ใจในนโยบายที่จะออกมาอีกในอนาคต นอกจากนี้การที่ลูกค้าสามารถลงทุนเพิ่มเติมในการติดตั้งระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Scrubber เพื่อใช้ HSFO หรือระบบ LNG เพื่อใช้เชื้อเพลิงเป็น LNG ทำให้ผู้ผลิตเกิดความไม่มั่นใจในการลงทุนเพิ่มเติม

- ผู้จำหน่าย ให้ความเห็นที่สำคัญว่า เชื้อเพลิงสำหรับใช้ในเรือขนส่ง ต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาต่ำที่สุดและยังผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำของ ISO และ IMO เนื่องจากลูกค้าคำนึงถึงต้นทุนค่าขนส่งเป็นสิ่งที่สำคัญในการแข่งขัน สำหรับผู้จำหน่ายแล้ว ปัจจัยในการจำหน่ายอยู่ที่ระบบที่ลูกค้าติดตั้ง ถ้าหากลูกค้าไม่ได้ติดตั้งระบบใดๆ สามารถใช้ MGO ได้ แต่ถ้าลูกค้าติดตั้งระบบ Scrubber หรือ LNG ก็สามารถใช้ HSFO หรือ LNG ที่ผู้จำหน่ายสามารถเลือกจำหน่ายได้
- ผู้ใช้หรือเจ้าของเรือขนส่ง เป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่มีผลกระทบค่อนข้างมาก และต้องพิจารณาทางเลือกว่าจะลงทุนในระบบต่างๆ หรือไม่ จากการสัมภาษณ์พบว่าเจ้าของเรือขนส่งทั้ง 3 ราย ไม่มีความประสงค์ในการลงทุนติดตั้งระบบต่างๆ เพิ่มเติม เนื่องจากการลงทุนทั้งระบบ Scrubber หรือ LNG จะทำให้เจ้าของเรือมีภาระค่าลงทุนที่สูงมาก และธุรกิจเรือขนส่งเป็นธุรกิจที่มีกำไรไม่มากและระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างนาน ทางเลือกที่เหมาะสมคือการเลือกใช้ LSFO หรือ MGO ที่มีราคาสูงกว่า แต่คาดว่าจะสามารถผลักภาระโดยการเพิ่มค่าขนส่งให้กับผู้ว่าจ้างขนส่งได้ และการใช้ LSFO หรือ MGO ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีจำหน่ายทั่วไปในปัจจุบันไม่ต้องกังวลเรื่องการต้องหาเชื้อเพลิงเฉพาะเหมือน LNG ที่อาจจะไม่มีจำหน่ายในบางท่าเรือ
- ผู้ควบคุมกฎ ได้แก่ กรมเจ้าท่า พร้อมที่ปฏิบัติตามกฎระเบียบและข้อกำหนดของ IMO เมื่อมีผลบังคับใช้ได้ทันที โดยกรมเจ้าท่าให้ความเห็นที่น่าสนใจว่า การติดตั้งระบบ Scrubber อาจจะมีประเด็นปัญหาการไม่ได้รับการยอมรับจาก IMO ในอนาคต เนื่องจากมีความกังวลในการปฏิบัติงานว่าเรือขนส่งจะเปิดระบบดังกล่าวตลอดเวลาในการเดินเรือหรือไม่ และประเทศไทยมีแผนที่จะลงนามในอนุสัญญาระหว่างประเทศว่าด้วยการป้องกันการปลดปล่อยมลภาวะทางทางทะเลจากเรือ (Marpol Annex VI) กับ IMO ภายใน 2-3 ปีข้างหน้า
- ความน่าสนใจในการใช้ผลิตภัณฑ์ MLB20 เมื่อสอบถามจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมด สรุปได้ว่า คุณภาพต้องผ่านข้อกำหนดขั้นต่ำของ ISO และ IMO และราคาต้องสามารถแข่งขันกับ LSFO หรือ MGO ได้ จึงจะสามารถนำผลิตภัณฑ์ MLB20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ออกมาจำหน่ายได้ โดยความเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมทำให้ผู้ผลิตหรือโรงกลั่นน้ำมันมีความสนใจในนวัตกรรมดังกล่าว และการคาดการณ์ว่าต้นทุนราคามีความเป็นไปได้ที่จะลดลง 3-5 เท่าเมื่อมีการผลิตในเชิงพาณิชย์

- เมื่อวิเคราะห์ราคาน้ำมันดิบในอนาคตเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ของ MLB20 พบว่า มีโอกาสเป็นอย่างยิ่งที่ราคาน้ำมันดิบจะเพิ่มขึ้นจากปัจจุบันเป็น 2 เท่า เนื่องจากเมื่อถึงปี ค.ศ. 2020 เรือขนส่งจะหันมาใช้ MGO หรือ Gas oil ทดแทน HSFO ในปัจจุบัน ซึ่งอุปทานของ Gas oil ทั่วโลกยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยผู้ผลิตต่างๆ อาจจะต้องติดตั้ง Coker unit เพื่อทำการผลิต Gas oil เพิ่มเติม จากการศึกษาความแตกต่างของราคาน้ำมันดิบและราคา Gas oil กับราคา HSFO ในช่วงปี ค.ศ. 2014 ถึงปัจจุบัน พบว่าราคาเฉลี่ยของน้ำมันดิบและราคา Gas oil สูงกว่าราคา HSFO เท่ากับ 86 และ 196 เหรียญสหรัฐต่อตันตามลำดับ และ เนื่องจากราคา MLB20 ที่ผลิตได้ มีราคา 201.96 บาทต่อลิตร หรือเท่ากับ 183.97 บาทต่อกิโลกรัม (ความหนาแน่นจากตารางที่ 4.5 เท่ากับ 910.9 kg/m3) หรือเท่ากับ 5,394 เหรียญสหรัฐต่อตัน ทำให้คาดการณ์ได้ว่าถ้าหากอนาคตราคาน้ำมันดิบมีค่าเท่ากับ 5,284 เหรียญสหรัฐต่อตัน หรือ 703 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล น้ำมัน MLB20 จากการศึกษานี้ จึงจะสามารถแข่งขันในเชิงพาณิชย์ได้
- จากการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการผลิต MLB20 เพื่อการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยมีสมมติฐานสำคัญคือ
    - น้ำมัน MLB20 ที่ได้จากกระบวนการผลิตผ่านข้อกำหนดทุกประการของ ISO 8217
    - ราคาจำหน่ายของ MLB20 คิดเทียบเท่ากับราคาจำหน่ายของ LSFO ในปัจจุบันคือ 26.94 บาทต่อลิตร
    - เนื่องจากตลาดของ HSFO ในประเทศไทยในปัจจุบัน คือ 100 ล้านลิตรต่อเดือน ซึ่งคาดการณ์ว่าปริมาณการใช้ LSFO ในประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ. 2020 ยังมีค่าใกล้เคียงปริมาณดังกล่าว ซึ่งคาดการณ์ว่าจะสามารถจำหน่ายน้ำมัน MLB20 ได้เดือนละ 1 แสนลิตรต่อเดือน คิดเป็น 0.1% ของตลาด
    - ยอดขายของ MLB20 ขยายเพิ่มขึ้นปีละ 5% และราคาขายเพิ่มขึ้นปีละ 5% จากอัตราเงินเฟ้อและนโยบายของบริษัทในการผลักดันราคาจำหน่าย
    - ค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉลี่ย 5% ต่อปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ค่าเช่าคลังคิดราคาเทียบเท่ากับการเช่าคลังน้ำมันเฉลี่ยที่ 0.40 บาท/ลิตร สำหรับการเช่าถังน้ำมันขนาด 200,000 ลิตร ณ คลังน้ำมันศรีราชา
- ค่าขนส่งน้ำมันสำหรับรถขนาด 30,000 ลิตร จากอยุธยามายังคลังน้ำมันศรีราชาเฉลี่ยเท่ากับ 0.30 บาทต่อลิตร สำหรับราคาน้ำมันดีเซลในช่วง 25-30 บาทต่อลิตร
- ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge จากคลังน้ำมันศรีราชาไปยังจุดทอดสมอเรือเท่ากับ 8 เหรียญสหรัฐต่อตัน สำหรับปริมาณจัดส่ง 100,000 ลิตรต่อครั้ง
- พื้นที่เพาะปลูกสาหร่าย 1 เอเคอร์ หรือเท่ากับ 4,046 ตารางเมตร สามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 60 ตันต่อปี (Singh et al., 2011) และราคาจำหน่ายคาร์บอนเครดิตในเดือนมิถุนายน 2561 เท่ากับ 565 บาท/ตัน (ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2561)
- อัตราภาษี (Tax) 20% ของกำไรสุทธิ (ที่มา: กรมสรรพากร)
- ต้นทุนทางการเงินเฉลี่ย (Weighted Average Cost of Capital, WACC) 12% โดยเป็นต้นทุนจากการกู้ยืมและต้นทุนส่วนของผู้ถือหุ้น
- ค่าเสื่อมราคา (Depreciation) ของสินทรัพย์ต่างๆ มีดังนี้
    - อาคารสำนักงาน 20 ปี
    - โรงงาน 20 ปี
    - เครื่องจักรในโรงงาน 5 ปี
- การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาต้นทุนการผลิต MLB20 ในงานวิจัยนี้ ดังนี้
    - สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ผลผลิต 0.05% (น้ำสาหร่าย 1 ลิตร ได้สาหร่ายแห้ง 0.5 กรัม) และเก็บเกี่ยวได้ทุกๆ 7 วัน โดยใน 1 เดือนมีการเก็บเกี่ยวเฉลี่ย 4 ครั้ง
    - ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กได้ส่วนที่เป็นน้ำมัน 18.65%
    - ต้นทุนทางตรงของการผลิต MLB20 จากการศึกษาได้เท่ากับ 201.96 บาท/ลิตร

พบว่าจากการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ (Project Feasibility) ในระยะเวลา 20 ปี ตามสมมติฐานดังที่ได้กล่าวมา พบว่าโครงการลงทุนผลิต MLB20 ยังไม่มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความคุ้มค่าทางการเงิน มีผลตอบแทนการลงทุน (IRR) เป็นลบ มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นลบ จากการลงทุนเริ่มต้น 1,515.60 ล้านบาท

อย่างไรก็ดี เมื่อศึกษาความวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) จากตัวแปรสำคัญคือ ค่าลงทุนเริ่มต้น ต้นทุนการผลิตทางตรงและราคาขาย โดยเมื่อศึกษาค่าลงทุนเริ่มต้นร่วมกับต้นทุนการผลิตทางตรง พบว่าถ้าต้องการให้โครงการมีความเป็นไปได้ ต้องมีเทคโนโลยีที่สามารถลดต้นทุนการผลิต MLB20 ให้ได้อย่างน้อยต่ำกว่า 5% (10.10 บาท/ลิตร) และต้องสามารถลดค่าลงทุนเริ่มต้นให้ไม่เกิน 10% (151.60 ล้านบาท) ของการลงทุนการผลิต MLB20 ที่ได้จากการศึกษานี้ หรือเมื่อศึกษาราคาขาย ต้องสามารถจำหน่าย MLB20 ให้ได้ราคาสูงกว่า 310 บาท/ลิตร โดยขึ้นกับภาวะราคาน้ำมันในตลาดโลก อุปสงค์และอุปทานของน้ำมันเตากำมะถันต่ำในขณะนั้น

## 6.2 ข้อจำกัดในงานวิจัย

1. ข้อมูลต้นทุนของการผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าแห้งแบบผง ได้จากการเก็บข้อมูลจากฟาร์มสาหร่ายเพียง 1 ฟาร์ม เนื่องจากมีฟาร์มเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าในประเทศไทยน้อยราย และการเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวทำได้ค่อนข้างยาก
2. ข้อมูลต้นทุนการไพโรไลซิสจากเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้นทุนกระบวนการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีค่าสูงกว่าต้นทุนการไพโรไลซิสในภาคอุตสาหกรรมประมาณ 40-60 เท่า
3. การประมาณการค่าโสหุ้ยการผลิต (Overhead cost) ในระดับอุตสาหกรรมเป็นกระบวนการที่ทำได้ค่อนข้างยาก และค่าโสหุ้ยการผลิตที่ประมาณการจากงานวิจัยนี้อาจมีค่าที่แตกต่างจากความเป็นจริงในการดำเนินธุรกิจ

## 6.3 ข้อเสนอแนะการวิจัยในอนาคต

จากการที่สาหร่ายขนาดเล็กมีความน่าสนใจในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงระยะยาวในอนาคต เนื่องจากการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ความสามารถในการผลิตได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีข้อจำกัดในด้านการผลิต และการได้ผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสที่น่าพึงพอใจ การศึกษาการสร้างนวัตกรรมน้ำมันเตากำมะถันต่ำจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนี้ ควรได้รับการพัฒนาด้านวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพิ่มเติม ดังนี้

- การศึกษาการลดต้นทุนค่าสารอาหารสำหรับสาหร่ายขนาดเล็ก และการเพิ่มปริมาณผลผลิตของสาหร่ายในช่วงการเพาะเลี้ยง เพื่อลดต้นทุนการผลิตสาหร่ายแห้งให้ต่ำที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- การศึกษาการใช้สาหร่ายชนิดอื่นๆ ที่มีต้นทุนต่ำมาใช้ทดลอง เช่น สาหร่ายที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติต่างๆ เช่น สาหร่ายพุงชะโด สาหร่ายหางกระรอก
- การศึกษาการเพิ่มผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิส จากการขยายระดับของเครื่องปฏิกรณ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในระดับอุตสาหกรรม
- การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน MPO ด้านการลดปริมาณน้ำและความเป็นกรด และ ULO ด้านการลดปริมาณขี้เถ้า ก่อนนำมาผสมเพื่อผลิต LSFO เพื่อให้ได้ผลการทดสอบผ่านเกณฑ์ของ ISO 8217 ทั้งหมด
- การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำเพื่อสร้างนวัตกรรมจากชีวมวลอื่นๆ ที่มีมากในประเทศไทย เพื่อตอบสนองความต้องการของโลก

**6.4 ประโยชน์ของการศึกษา**

1. ประโยชน์ในแง่ทฤษฎี หรือความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้น (Academic Contribution)
    1) ด้านเทคโนโลยี (Technology) ได้กระบวนการและสูตรการผลิตน้ำมันเตากำมะถันต่ำ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็กและการผสมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Pyrolysis and blending Process) ซึ่งสามารถนำเทคโนโลยีที่ใช้ไปเป็นแนวทางเพื่อการศึกษาต่อไป
    2) ด้านนวัตกรรม (Innovation) จากปัญหาของธุรกิจเรือขนส่งที่มีความต้องการใช้น้ำมันเตากำมะถันต่ำ จึงเป็นแนวคิดในการสร้างนวัตกรรมด้านผลิตภัณฑ์ (Product Innovation) เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง เพื่อผลักดันให้ออกไปสู่เชิงพาณิชย์ และเป็นนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม (Green Innovation) ที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
    3) ด้านการจัดการ (Management) ได้ทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ตามมาตรฐานของ ISO ข้อมูลต้นทุนการผลิตทั้งกระบวนการ การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการผลิต MLB20 เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาพัฒนาในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. ประโยชน์ในด้านการนำไปใช้จริง (Practical Contribution)
    1) ผู้เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ได้กระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากสาหร่ายและการปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมน้ำมัน เพื่อการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์
    2) การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตเชื้อเพลิง ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในอากาศ ลดภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นไปตามความต้องการของโลกที่มีการควบคุมดูและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเข้มงวด
    3) การได้เชื้อเพลิงกำมะถันต่ำที่ลดมลภาวะในอากาศและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีความยั่งยืน สามารถผลิตได้โดยไม่จำกัดปริมาณ และสร้างเสถียรภาพในเชิงพลังงานให้กับโลก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# รายการอ้างอิง

Anastasakis, K., & Ross, A. (2011). Hydrothermal liquefaction of the brown macro-alga Laminaria saccharina: effect of reaction conditions on product distribution and composition. *Bioresource Technology, 102*(7), 4876-4883.

Aysu, T., Abd Rahman, N. A., & Sanna, A. (2016). Catalytic pyrolysis of Tetraselmis and Isochrysis microalgae by nickel ceria based catalysts for hydrocarbon production. *Energy, 103*, 205-214. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.055

Azizi, K., Keshavarz Moraveji, M., & Abedini Najafabadi, H. (2018). A review on bio-fuel production from microalgal biomass by using pyrolysis method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, 3046-3059. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.033

Becker, E. W. (1994). *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*: Cambridge University Press.

Beld, B. v. d., Holle, E., & Florijn, J. (2018). The use of a fast pyrolysis oil – Ethanol blend in diesel engines for chp applications. *Biomass and Bioenergy, 110*, 114-122. doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.023

Belotti, G., de Caprariis, B., De Filippis, P., Scarsella, M., & Verdone, N. (2014). Effect of Chlorella vulgaris growing conditions on bio-oil production via fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy, 61*, 187-195. doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.011

Biller, P., & Ross, A. B. (2011). Potential yields and properties of oil from the hydrothermal liquefaction of microalgae with different biochemical content. *Bioresource Technology, 102*(1), 215-225. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.028

Borges, F. C., Xie, Q., Min, M., Muniz, L. A. R., Farenzena, M., Trierweiler, J. O., . . . Ruan, R. (2014). Fast microwave-assisted pyrolysis of microalgae using microwave absorbent and HZSM-5 catalyst. *Bioresource Technology, 166*(0), 518-526. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Botas, J. A., Moreno, J., Espada, J. J., Serrano, D. P., & Dufour, J. (2017). Recycling of used lubricating oil: Evaluation of environmental and energy performance by LCA. *Resources, Conservation and Recycling, 125*, 315-323. doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.010

BP. (2018). BP Energy Outlook. Online.

Brownsort, P. A. (2009). Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits.

Capunitan, J. A., & Capareda, S. C. (2013). Characterization and separation of corn stover bio-oil by fractional distillation. *Fuel, 112*, 60-73. doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.079

Chaiwong, K., Kiatsiriroat, T., Vorayos, N., & Thararax, C. (2013). Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis. *Biomass and Bioenergy, 56*, 600-606. doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.035

Chen, J., Ci, J., Lai Wei, X., Min Yu, Z., & Jin, J. (2015). Pyrolysis of wild cyanophyta from Chaohu lake for bio-oil. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; Vol 2 (2015): Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Volume 2DO - 10.17770/etr2015vol2.630*.

Chen, L., Liu, T., Zhang, W., Chen, X., & Wang, J. (2012). Biodiesel production from algae oil high in free fatty acids by two-step catalytic conversion. *Bioresource Technology, 111*(0), 208-214. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.033

Chen, W.-H., Lin, B.-J., Huang, M.-Y., & Chang, J.-S. (2015). Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review. *Bioresource Technology, 184*, 314-327. doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.050

Chen, Y.-S., Lai, S.-B., & Wen, C.-T. (2006). The Influence of Green Innovation Performance on Corporate Advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics, 67*(4), 331-339. doi: 10.1007/s10551-006-9025-5

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances, 25*(3), 294-306. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001

Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. *Energy & Fuels, 18*(2), 590-598. doi: 10.1021/ef034067u

Demirbaş, A. (2006). Oily Products from Mosses and Algae via Pyrolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 28*(10), 933-940. doi: 10.1080/009083190910389

Donkor, A., Nyarko, S., Asemani, K. O., Bonzongo, J.-C., Kyeremeh, K., & Ziwu, C. (2016). A novel approach for reduction of total acidity in kerosene based on alkaline rich materials readily available in tropical and sub-tropical countries. *Egyptian Journal of Petroleum, 25*(4), 473-480. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.10.010

Dragone, G., Fernandes, B. D., Vicente, A. A., & Teixeira, J. A. (2010). Third generation biofuels from microalgae.

Duan, P., Jin, B., Xu, Y., & Wang, F. (2015). Co-pyrolysis of microalgae and waste rubber tire in supercritical ethanol. *Chemical Engineering Journal, 269*(0), 262-271. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.108

Duan, P., & Savage, P. E. (2011). Catalytic hydrotreatment of crude algal bio-oil in supercritical water. *Applied Catalysis B: Environmental, 104*(1–2), 136-143. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.02.020

Eboibi, B. E.-O., Lewis, D. M., Ashman, P. J., & Chinnasamy, S. (2014). Hydrothermal liquefaction of microalgae for biocrude production: Improving the biocrude properties with vacuum distillation. *Bioresource Technology, 174*, 212-221. doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.029

Ehimen, E. A., Sun, Z. F., & Carrington, C. G. (2010). Variables affecting the in situ transesterification of microalgae lipids. *Fuel, 89*(3), 677-684. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.011

Elliott, D. C., Hart, T. R., Neuenschwander, G. G., Rotness, L. J., Olarte, M. V., Zacher, A. H., & Solantausta, Y. (2012). Catalytic Hydroprocessing of Fast Pyrolysis Bio-oil from Pine Sawdust. *Energy & Fuels, 26*(6), 3891-3896. doi: 10.1021/ef3004587

Frank, E., Elgowainy, A., Han, J., & Wang, Z. (2013). Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 18*(1), 137-158. doi: 10.1007/s11027-012-9395-1

Fregolente, P. B. L., Wolf Maciel, W. M., & Oliveira, L. S. (2015). REMOVAL OF WATER CONTENT FROM BIODIESEL AND DIESEL FUEL USING HYDROGEL ADSORBENTS. *Brazilian Journal of Chemical Engineering, 32*, 895-901.

Garcia-Perez, M., Adams, T. T., Goodrum, J. W., Geller, D. P., & Das, K. C. (2007). Production and Fuel Properties of Pine Chip Bio-oil/Biodiesel Blends. *Energy & Fuels, 21*(4), 2363-2372. doi: 10.1021/ef060533e

Gerde, J. A., Wang, T., Yao, L., Jung, S., Johnson, L. A., & Lamsal, B. (2013). Optimizing protein isolation from defatted and non-defatted Nannochloropsis microalgae biomass. *Algal Research, 2*(2), 145-153. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2013.02.001

Gurevich Messina, L. I., Bonelli, P. R., & Cukierman, A. L. (2015). Copyrolysis of peanut shells and cassava starch mixtures: Effect of the components proportion. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 113*, 508-517. doi: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.03.017

Hamad, A., Al-Zubaidy, E., & Fayed, M. E. (2005). Used lubricating oil recycling using hydrocarbon solvents. *Journal of environmental management, 74*(2), 153-159. doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.09.002

He, R., Ye, X. P., English, B. C., & Satrio, J. A. (2009). Influence of pyrolysis condition on switchgrass bio-oil yield and physicochemical properties. *Bioresource Technology, 100*(21), 5305-5311. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.069

Heo, H. S., Park, H. J., Park, Y.-K., Ryu, C., Suh, D. J., Suh, Y.-W., . . . Kim, S.-S. (2010). Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed. *Bioresource Technology, 101*(1, Supplement), S91-S96. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.003

Hognon, C., Delrue, F., & Boissonnet, G. (2015). Energetic and economic evaluation of Chlamydomonas reinhardtii hydrothermal liquefaction and pyrolysis through thermochemical models. *Energy, 93*, 31-40. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.021

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Hossain, A. S., Salleh, A., Boyce, A. N., Chowdhury, P., & Naqiuddin, M. (2008). Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *American journal of biochemistry and biotechnology, 4*(3), 250-254.

Hsu, Y.-L., & Liu, C.-C. (2011). Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology. *Environmental Monitoring and Assessment, 176*(1), 197-212. doi: 10.1007/s10661-010-1576-3

Huang, J., Xia, J., Jiang, W., Li, Y., & Li, J. (2015). Biodiesel production from microalgae oil catalyzed by a recombinant lipase. *Bioresource Technology, 180*(0), 47-53. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.072

Huntley, M., & Redalje, D. (2007). CO2 Mitigation and Renewable Oil from Photosynthetic Microbes: A New Appraisal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 12*(4), 573-608. doi: 10.1007/s11027-006-7304-1

Hürdoğan, E., Ozalp, C., Kara, O., & Ozcanli, M. (2017). Experimental investigation on performance and emission characteristics of waste tire pyrolysis oil–diesel blends in a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*(36), 23373-23378. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.126

IEA. (2016). Energy and Air Pollution *WEO-2016 Special Report* (pp. 266). https://webstore.iea.org/weo-2016-special-report-energy-and-air-pollution: International Energy Agency.

International Energy Agency. (2016). Oil Medium-Term Market Report 2016 *Medium-Term Outlook for Bunker Fuel Markets*. Rotterdam: IEA.

International Maritime Organization. (2016). IMO sets 2020 date for ships to comply with low sulphur fuel oil requirement [Press release]. Retrieved from http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/MEPC-70-2020sulphur.aspx

Islam, M. N., Islam, M. N., & Beg, M. R. A. (2004). The fuel properties of pyrolysis liquid derived from urban solid wastes in Bangladesh. *Bioresource Technology, 92*(2), 181-186. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2003.08.009

Jazzar, S., Olivares-Carrillo, P., Pérez de los Ríos, A., Marzouki, M. N., Acién-Fernández, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., . . . Quesada-Medina, J. (2015). Direct supercritical methanolysis of wet and dry unwashed marine microalgae

(Nannochloropsis gaditana) to biodiesel. *Applied Energy, 148*(0), 210-219. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.069

Jiu, B.-B., Li, B.-X., & Yu, Q.-J. (2015). Effects of Pb on pyrolysis behavior of water hyacinth. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 112*, 270-275. doi: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.015

Jones, S. B., Zhu, Y., Anderson, D. M., Hallen, R. T., Elliott, D. C., Schmidt, A., . . . Drennan, C. (2014). *Process design and economics for the conversion of algal biomass to hydrocarbons: whole algae hydrothermal liquefaction and upgrading*: Pacific Northwest National Laboratory.

Kanokkantapong, V., Kiatkittipong, W., Panyapinyopol, B., Wongsuchoto, P., & Pavasant, P. (2009). Used lubricating oil management options based on life cycle thinking. *Resources, Conservation and Recycling, 53*(5), 294-299. doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.01.002

Kheireddine, H. A., El-Halwagi, M. M., & Elbashir, N. O. (2013). A property-integration approach to solvent screening and conceptual design of solvent-extraction systems for recycling used lubricating oils. *Clean Technologies and Environmental Policy, 15*(1), 35-44. doi: 10.1007/s10098-012-0482-5

Kim, S. W., Koo, B. S., & Lee, D. H. (2014). A comparative study of bio-oils from pyrolysis of microalgae and oil seed waste in a fluidized bed. *Bioresource Technology, 162*, 96-102. doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.136

Krutof, A., & Hawboldt, K. (2016). Blends of pyrolysis oil, petroleum, and other bio-based fuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59*, 406-419. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.304

Küçükoğlu, M. T., & Pınar, R. İ. (2015). Positive Influences of Green Innovation on Company Performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 195*, 1232-1237. doi: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.261

Lardon, L., Helias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P., & Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental science & technology, 43*(17), 6475-6481.

Lee, K.-H., Kang, B.-S., Park, Y.-K., & Kim, J.-S. (2005). Influence of Reaction Temperature, Pretreatment, and a Char Removal System on the Production

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

of Bio-oil from Rice Straw by Fast Pyrolysis, Using a Fluidized Bed. *Energy & Fuels, 19*(5), 2179-2184. doi: 10.1021/ef050015o

Leong, S. K., Lam, S. S., Ani, F. N., Ng, J.-H., & Chong, C. T. (2016). *Production of Pyrolyzed Oil from Crude Glycerol using a Microwave Heating Technique* (Vol. 7).

Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C. Q., & Dubois‐Calero, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnology progress, 24*(4), 815-820.

Lokesh, K., Sethi, V., Nikolaidis, T., Goodger, E., & Nalianda, D. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. *Biomass and Bioenergy, 77*(0), 26-44. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.005

Lu, J., Guo, S., Fu, Y., & Chang, J. (2017). Catalytic upgrading of bio-oil by simultaneous esterification and alkylation with azeotropic water removal. *Fuel Processing Technology, 161*, 193-198. doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.020

Manyuchi, M., & Nengiwa, T. (2015). *TECHNO FEASIBILITY FOR REFINING OF USED LUBRICATING OILS AS A VALUE ADDITION STRATEGY*.

Marcilla, A., Catalá, L., García-Quesada, J. C., Valdés, F. J., & Hernández, M. R. (2013). A review of thermochemical conversion of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27*(0), 11-19. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.032

Martin, J. A., & Boateng, A. A. (2014). Combustion performance of pyrolysis oil/ethanol blends in a residential-scale oil-fired boiler. *Fuel, 133*, 34-44. doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.005

Mascarelli, A. L. (2009). Gold rush for algae. *Nature News, 461*(7263), 460-461.

Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10*(3), 248-268. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Miao, X., & Wu, Q. (2004). High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of Chlorella protothecoides. *Journal of Biotechnology, 110*(1), 85-93. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.01.013

Miao, X., Wu, Q., & Yang, C. (2004). Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 71*(2), 855-863. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2003.11.004

Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels, 20*(3), 848-889. doi: 10.1021/ef0502397

Na, J.-G., Han, J. K., Oh, Y.-K., Park, J.-H., Jung, T. S., Han, S. S., . . . Ko, C. H. (2012). Decarboxylation of microalgal oil without hydrogen into hydrocarbon for the production of transportation fuel. *Catalysis Today, 185*(1), 313-317. doi: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.08.009

Nileshkumar, K. D., Jani, R., Patel, T. M., & Rathod, G. P. (2015). Effect of blend ratio of plastic pyrolysis oil and diesel fuel on the performance of single cylinder CI engine. *IJSTE-Int. J. Sci. Technol. Eng., 1*.

Organzation, I. M. (2005, 18 May 2005). New rules to reduce emissions from ships enter into force.

Pan, P., Hu, C., Yang, W., Li, Y., Dong, L., Zhu, L., . . . Fan, Y. (2010). The direct pyrolysis and catalytic pyrolysis of Nannochloropsis sp. residue for renewable bio-oils. *Bioresource Technology, 101*(12), 4593-4599. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.070

Pidtasang, B., Udomsap, P., Sukkasi, S., Chollacoop, N., & Pattiya, A. (2013). Influence of alcohol addition on properties of bio-oil produced from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free-fall reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 19*(6), 1851-1857. doi: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.02.031

Promdee, K., Phihusut, D., Monthienvichienchai, A., Tongaram, Y., & Khongsuk, P. (2018). Conversion of Hydrilla verticillata to bio-oil and charcoal using a continuous pyrolysis reactor. *Biofuels*, 1-9. doi: 10.1080/17597269.2018.1448633

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ramos Tercero, E. A., Domenicali, G., & Bertucco, A. (2014). Autotrophic production of biodiesel from microalgae: An updated process and economic analysis. *Energy, 76*(0), 807-815. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.077

Remiro, A., Valle, B., Aguayo, A. T., Bilbao, J., & Gayubo, A. G. (2013). Operating conditions for attenuating Ni/La2O3–αAl2O3 catalyst deactivation in the steam reforming of bio-oil aqueous fraction. *Fuel Processing Technology, 115*, 222-232. doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.06.003

Rincón, J., Cañizares, P., García, M. T., & Gracia, I. (2003). Regeneration of Used Lubricant Oil by Propane Extraction. *Industrial & engineering chemistry research, 42*(20), 4867-4873. doi: 10.1021/ie030013w

Roddy, D. J., & Manson-Whitton, C. (2012). 5.10 - Biomass Gasification and Pyrolysis A2 - Sayigh, Ali *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 133-153). Oxford: Elsevier.

Rogers Everett, M. (1995). Diffusion of innovations. *New York*.

Ross, A. B., Biller, P., Kubacki, M. L., Li, H., Lea-Langton, A., & Jones, J. M. (2010). Hydrothermal processing of microalgae using alkali and organic acids. *Fuel, 89*(9), 2234-2243. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.025

S&P Global Platts. (2018). Oil – Market Data. S&P Global Platts Products & Services.

Saka, S., & Kusdiana, D. (2001). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel, 80*(2), 225-231. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1

Sanyano, N., Chetpattananondh, P., & Chongkhong, S. (2011). *Optimization of flocculation of marine Chlorella sp. by response surface methodology.* Paper presented at the TICHE International Conference at Hatyai, Songkhla, Thailand.

Sawaengsak, W., Silalertruksa, T., Bangviwat, A., & Gheewala, S. H. (2014). Life cycle cost of biodiesel production from microalgae in Thailand. *Energy for Sustainable Development, 18*, 67-74.

Seo, Y. H., Sung, M., Oh, Y.-K., & Han, J.-I. (2015). Lipid extraction and esterification for microalgae-based biodiesel production using pyrite (FeS2). *Bioresource Technology, 191*(0), 420-425. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.083

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Sharifzadeh, M., Richard, C. J., Liu, K., Hellgardt, K., Chadwick, D., & Shah, N. (2015). An integrated process for biomass pyrolysis oil upgrading: A synergistic approach. *Biomass and Bioenergy, 76*, 108-117. doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.003

Shen, J., Wang, X.-S., Garcia-Perez, M., Mourant, D., Rhodes, M. J., & Li, C.-Z. (2009). Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. *Fuel, 88*(10), 1810-1817. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.001

Shin, H.-Y., Ryu, J.-H., Bae, S.-Y., Crofcheck, C., & Crocker, M. (2014). Lipid extraction from Scenedesmus sp. microalgae for biodiesel production using hot compressed hexane. *Fuel, 130*, 66-69.

Singh, S., Jha, M. K., Bansal, A., & Pal Singh, A. (2011). *Carbon credit market and Algae-based CO2 sequestration technology: A Review*.

Smith, S. J., van Aardenne, J., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A., & Delgado Arias, S. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmos. Chem. Phys., 11*(3), 1101-1116. doi: 10.5194/acp-11-1101-2011

Tabernero, A., Martín del Valle, E. M., & Galán, M. A. (2012). Evaluating the industrial potential of biodiesel from a microalgae heterotrophic culture: Scale-up and economics. *Biochemical Engineering Journal, 63*(0), 104-115. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2011.11.006

Tan, C. H., Show, P. L., Chang, J.-S., Ling, T. C., & Lan, J. C.-W. (2015). Novel approaches of producing bioenergies from microalgae: A recent review. *Biotechnology Advances*(0). doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.013

Thilakaratne, R., Wright, M. M., & Brown, R. C. (2014). A techno-economic analysis of microalgae remnant catalytic pyrolysis and upgrading to fuels. *Fuel, 128*(0), 104-112. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.077

Torres, S., Acien, G., García-Cuadra, F., & Navia, R. (2017). Direct transesterification of microalgae biomass and biodiesel refining with vacuum distillation. *Algal Research, 28*, 30-38. doi: https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.10.001

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Tsai, W.-T. (2011). An analysis of used lubricant recycling, energy utilization and its environmental benefit in Taiwan. *Energy, 36*(7), 4333-4339. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.008

Uçar, S., Karagöz, S., Yanik, J., Saglam, M., & Yuksel, M. (2005). Copyrolysis of scrap tires with waste lubricant oil. *Fuel Processing Technology, 87*(1), 53-58. doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.06.001

Umeki, E. R., de Oliveira, C. F., Torres, R. B., & Santos, R. G. d. (2016). Physico-chemistry properties of fuel blends composed of diesel and tire pyrolysis oil. *Fuel, 185*, 236-242. doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.092

Vandamme, D., Foubert, I., & Muylaert, K. (2013). Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in Biotechnology, 31*(4), 233-239. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.005

Vardon, D. R., Sharma, B. K., Blazina, G. V., Rajagopalan, K., & Strathmann, T. J. (2012). Thermochemical conversion of raw and defatted algal biomass via hydrothermal liquefaction and slow pyrolysis. *Bioresource Technology, 109*(0), 178-187. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.008

Wang, H.-Y., Bluck, D., & Van Wie, B. J. (2014). Conversion of microalgae to jet fuel: Process design and simulation. *Bioresource Technology, 167*(0), 349-357. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.092

Wang, K., Brown, R. C., Homsy, S., Martinez, L., & Sidhu, S. S. (2013). Fast pyrolysis of microalgae remnants in a fluidized bed reactor for bio-oil and biochar production. *Bioresource Technology, 127*, 494-499. doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.016

Wang, X., Zhao, B., & Yang, X. (2016). Co-pyrolysis of microalgae and sewage sludge: Biocrude assessment and char yield prediction. *Energy Conversion and Management, 117*, 326-334. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.013

Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C., & Tangsathitkulchai, M. (2009). Phase behaviors and fuel properties of bio-oil-diesel-alcohol blends. *World Acad Sci Eng Technol, 56*, 387-393.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Weng, H.-H., Chen, J.-S., & Chen, P.-C. (2015). Effects of Green Innovation on Environmental and Corporate Performance: A Stakeholder Perspective. *Sustainability, 7*(5), 4997.

Wiley. (2015). *INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*: John Wiley & Sons.

Wisniewski Jr, A., Wosniak, L., Scharf, D. R., Wiggers, V. R., Meier, H. F., & Simionatto, E. L. (2015). Upgrade of Biofuels Obtained from Waste Fish Oil Pyrolysis by Reactive Distillation. *Journal of the Brazilian Chemical Society, 26*, 224-232.

Xu, L., Brilman, D. W. F., Withag, J. A. M., Brem, G., & Kersten, S. (2011). Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. *Bioresource Technology, 102*(8), 5113-5122. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.066

Xu, R., Ferrante, L., Briens, C., & Berruti, F. (2009). Flash pyrolysis of grape residues into biofuel in a bubbling fluid bed. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 86*(1), 58-65. doi: 10.1016/j.jaap.2009.04.005

Yang, H., Yao, J., Chen, G., Ma, W., Yan, B., & Qi, Y. (2014). Overview of Upgrading of Pyrolysis Oil of Biomass. *Energy Procedia, 61*, 1306-1309. doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1087

Yang, Y., Brammer, J. G., Samanya, J., Hossain, A. K., & Hornung, A. (2013). Investigation into the performance and emissions of a stationary diesel engine fuelled by sewage sludge intermediate pyrolysis oil and biodiesel blends. *Energy, 62*, 269-276. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.058

Yanik, J., Kornmayer, C., Saglam, M., & Yüksel, M. (2007). Fast pyrolysis of agricultural wastes: Characterization of pyrolysis products. *Fuel Processing Technology, 88*(10), 942-947. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.05.002

Yen, H.-W., Hu, I. C., Chen, C.-Y., Ho, S.-H., Lee, D.-J., & Chang, J.-S. (2013). Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products. *Bioresource Technology, 135*(0), 166-174. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.099

Yu, G., Zhang, Y., Schideman, L., Funk, T., & Wang, Z. (2011). Distributions of carbon and nitrogen in the products from hydrothermal liquefaction of low-lipid

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

microalgae. *Energy & Environmental Science, 4*(11), 4587-4595. doi: 10.1039/C1EE01541A

Zhang, Q., Chang, J., Wang, T., & Xu, Y. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management, 48*(1), 87-92. doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.010

จีรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์. (2014). การวิเคราะห์ต้นทุนอุตสาหกรรมและการจัดทำงบประมาณ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

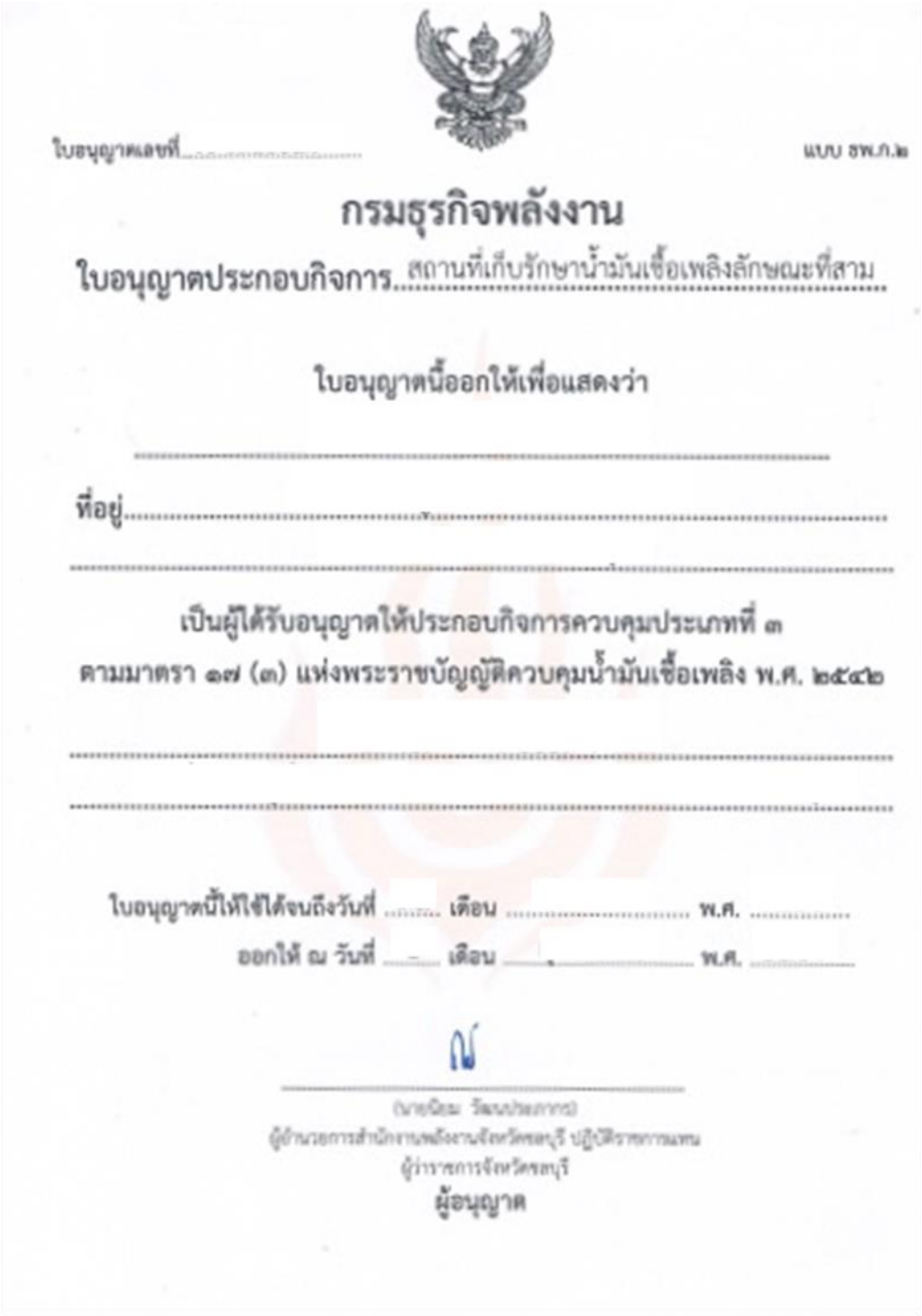


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวอย่างใบอนุญาตเพื่อประกอบกิจการสถานที่เก็บรักษาน้ำมันเชื้อเพลิงลักษณะที่สาม



ใบอนุญาตเลขที่.....  แบบ ธพ.ก.๒

**กรมธุรกิจพลังงาน**

**ใบอนุญาตประกอบกิจการ** สถานที่เก็บรักษาน้ำมันเชื้อเพลิงลักษณะที่สาม

**ใบอนุญาตนี้ออกให้เพื่อแสดงว่า**

.....

**ที่อยู่**.....

.....

**เป็นผู้ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการควบคุมประเภทที่ ๓**
**ตามมาตรา ๑๗ (๓) แห่งพระราชบัญญัติควบคุมน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. ๒๕๔๒**

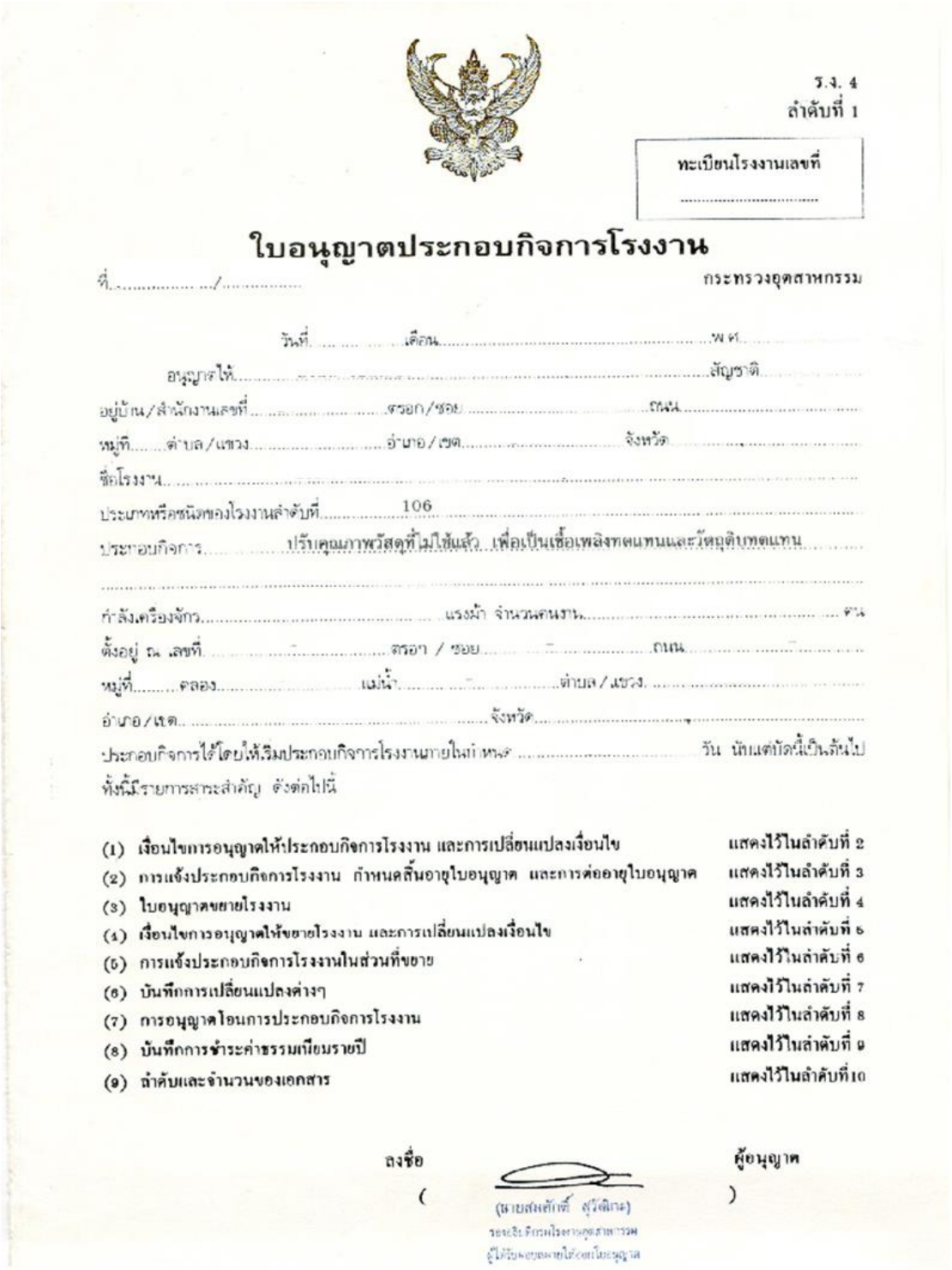
.....

.....

**ใบอนุญาตนี้ให้ใช้ได้จนถึงวันที่** ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....
**ออกให้ ณ วันที่** ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

(นายนิยม วัฒนประการ)
ผู้อำนวยการสำนักงานพลังงานจังหวัดชลบุรี ปฏิบัติราชการแทน
ผู้ว่าราชการจังหวัดชลบุรี
**ผู้อนุญาต**

ตัวอย่างใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานลำดับที่ 106



ร.ง. 4
ลำดับที่ 1

ทะเบียนโรงงานเลขที่
.....

# ใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน

ที่...../.....

กระทรวงอุตสาหกรรม

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

อนุญาตให้..... สัญชาติ.....

อยู่บ้าน/สำนักงานเลขที่..... ตรอก/ซอย..... ถนน.....

หมู่ที่..... ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

ชื่อโรงงาน.....

ประเภทหรือชนิดของโรงงานลำดับที่ 106

ประกอบกิจการ ปรับคุณภาพวัสดุที่ใช้แล้ว เพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนและวัตถุดิบทดแทน

.....

กำลังเครื่องจักร..... แรงม้า จำนวนคนงาน..... คน

ตั้งอยู่ ณ เลขที่..... ตรอก / ซอย..... ถนน.....

หมู่ที่..... คลอง..... แม่น้ำ..... ตำบล / แขวง.....

อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

ประกอบกิจการได้โดยให้เริ่มประกอบกิจการโรงงานภายในกำหนด..... วัน นับแต่วันนี้เป็นต้นไป

ทั้งนี้มีรายการสาระสำคัญ ดังต่อไปนี้

| | |
|---|---|
| (1) เงื่อนไขการอนุญาตให้ประกอบกิจการโรงงาน และการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข | แสดงไว้ในลำดับที่ 2 |
| (2) การแจ้งประกอบกิจการโรงงาน กำหนดสิ้นอายุใบอนุญาต และการต่ออายุใบอนุญาต | แสดงไว้ในลำดับที่ 3 |
| (3) ใบอนุญาตขยายโรงงาน | แสดงไว้ในลำดับที่ 4 |
| (4) เงื่อนไขการอนุญาตให้ขยายโรงงาน และการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข | แสดงไว้ในลำดับที่ 5 |
| (5) การแจ้งประกอบกิจการโรงงานในส่วนที่ขยาย | แสดงไว้ในลำดับที่ 6 |
| (6) บันทึกการเปลี่ยนแปลงต่างๆ | แสดงไว้ในลำดับที่ 7 |
| (7) การอนุญาตโอนการประกอบกิจการโรงงาน | แสดงไว้ในลำดับที่ 8 |
| (8) บันทึกการชำระค่าธรรมเนียมรายปี | แสดงไว้ในลำดับที่ 9 |
| (9) ลำดับและจำนวนของเอกสาร | แสดงไว้ในลำดับที่ 10 |

ลงชื่อ ( ) ผู้อนุญาต

(นายสมศักดิ์ สุวัฒิกุล)
รองอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม
ผู้ได้รับมอบอำนาจให้ออกใบอนุญาต

**รายละเอียดการคำนวณจำนวนบ่อสาหร่าย, ปริมาณสาหร่ายแห้งที่ผลิตได้ต่อเดือน และปริมาณการลด $CO_2$**

| **รายละเอียด** | **ปริมาณ** | **หน่วย** |
|---|---|---|
| ปริมาณที่ต้องผลิต MPO | 50,500 | ลิตร/เดือน |
| ปริมาณสาหร่ายแห้งต่อบ่อ | 12 | kg/7 วัน |
| ปริมาณ MPO ต่อบ่อ | 9 | ลิตร/เดือน |
| จำนวนบ่อที่ต้องการ | 5,641 | บ่อ |
| ปริมาณสาหร่ายแห้ง | 271,200 | kg/เดือน |
| พื้นที่เพาะปลูก | 451,280 | ตร.ม. |
| | 111.54 | Acre |
| ปริมาณการลด $CO_2$ | 6,692.24 | ตัน/ปี |
| | 3,781,115.18 | บาท/ปี |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**รายละเอียดเงินเดือนของพนักงานในบริษัท มารีน กรีน ออยล์ จำกัด**

| ตำแหน่งงาน | กรรมการผู้จัดการ | ผู้จัดการทั่วไป | ห้วหน้างาน | นักวิจัย | นักบัญชี | พนักงานขาย | พนักงานการตลาด | ผู้เชี่ยวชาญเทคนิค | พนักงานคุณภาพ ความปลอดภัย | พนักงานอื่นๆ (รปภ. แม่บ้าน) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ผู้บริหาร | 1 | 1 | | | | | | | | |
| ฝ่ายวิจัยและพัฒนา | | | 1 | 2 | | | | | | |
| ฝ่ายขายและการตลาด | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | |
| ฝ่ายบัญชีและการเงิน | | | 1 | | 2 | | | | | |
| ฝ่ายคุณภาพ ความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม | | | 1 | | | | | | 2 | |
| รวมจำนวนคน | 1 | 1 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| เงินเดือน/ตำแหน่ง | 100,000 | 70,000 | 45,000 | 30,000 | 25,000 | 30,000 | 30,000 | 30,000 | 25,000 | 10,000 |
| เงินเดือนรวม | 100,000 | 70,000 | 180,000 | 60,000 | 50,000 | 30,000 | 30,000 | 30,000 | 50,000 | 40,000 |
| รวมเงินเดือน (บาท/เดือน) | 640,000 | | | | | | | | | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Financial Analysis โครงการผลิต MLB20

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบ่อสาหร่าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **255.38** | **280.88** | **308.95** | **339.86** | **373.90** | **411.40** | **452.69** | **498.18** | **548.28** | **603.47** | **664.26** | **731.23** | **805.01** | **886.30** | **975.85** | **1074.52** | **1183.24** | **1303.03** | **1435.02** | **1580.46** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 201.96 | 212.06 | 222.66 | 233.79 | 245.48 | 257.76 | 270.65 | 284.18 | 298.39 | 313.31 | 328.97 | 345.42 | 362.69 | 380.83 | 399.87 | 419.86 | 440.85 | 462.90 | 486.04 | 510.34 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 242.35 | 267.19 | 294.58 | 324.77 | 358.06 | 394.77 | 435.23 | 479.84 | 529.02 | 583.25 | 643.03 | 708.94 | 781.61 | 861.72 | 950.05 | 1047.43 | 1154.79 | 1273.16 | 1403.66 | 1547.53 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไม่ยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **-221.24** | **-243.27** | **-267.53** | **-294.26** | **-323.69** | **-356.12** | **-391.85** | **-431.20** | **-474.55** | **-522.32** | **-574.94** | **-632.91** | **-696.78** | **-767.15** | **-844.68** | **-930.11** | **-1024.25** | **-1127.97** | **-1242.26** | **-1368.19** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -291.4 | -313.4 | -337.7 | -364.4 | -393.9 | -413.8 | -449.5 | -488.8 | -532.2 | -580.0 | -632.6 | -690.6 | -754.4 | -824.8 | -902.3 | -987.8 | -1081.9 | -1185.6 | -1299.9 | -1425.8 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-291.4** | **-313.4** | **-337.7** | **-364.4** | **-393.9** | **-413.8** | **-449.5** | **-488.8** | **-532.2** | **-580.0** | **-632.6** | **-690.6** | **-754.4** | **-824.8** | **-902.3** | **-987.8** | **-1081.9** | **-1185.6** | **-1299.9** | **-1425.8** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-1515.6** | **-221.2** | **-243.3** | **-267.5** | **-294.3** | **-323.7** | **-356.1** | **-391.8** | **-431.2** | **-474.6** | **-522.3** | **-574.9** | **-632.9** | **-696.8** | **-767.1** | **-844.7** | **-930.1** | **-1024.2** | **-1128.0** | **-1242.3** | **-1368.2** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 10% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 3%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบ่อสาหร่าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **20.30** | **21.70** | **23.21** | **24.83** | **26.58** | **28.48** | **30.52** | **32.73** | **35.12** | **37.71** | **40.52** | **43.56** | **46.85** | **50.43** | **54.30** | **58.52** | **63.09** | **68.06** | **73.47** | **79.36** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 6.06 | 6.36 | 6.68 | 7.01 | 7.36 | 7.73 | 8.12 | 8.53 | 8.95 | 9.40 | 9.87 | 10.36 | 10.88 | 11.42 | 12.00 | 12.60 | 13.23 | 13.89 | 14.58 | 15.31 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 7.27 | 8.02 | 8.84 | 9.74 | 10.74 | 11.84 | 13.06 | 14.40 | 15.87 | 17.50 | 19.29 | 21.27 | 23.45 | 25.85 | 28.50 | 31.42 | 34.64 | 38.19 | 42.11 | 46.43 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **13.84** | **15.91** | **18.21** | **20.78** | **23.63** | **26.80** | **30.33** | **34.25** | **38.60** | **43.44** | **48.81** | **54.77** | **61.38** | **68.72** | **76.87** | **85.89** | **95.90** | **107.00** | **119.29** | **132.92** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -56.3 | -54.3 | -52.0 | -49.4 | -46.5 | -30.8 | -27.3 | -23.4 | -19.1 | -14.2 | -8.8 | -2.9 | 3.7 | 11.1 | 19.2 | 28.2 | 38.3 | 49.3 | 61.6 | 75.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.75 | 2.21 | 3.84 | 5.65 | 7.65 | 9.87 | 12.33 | 15.05 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-56.3** | **-54.3** | **-52.0** | **-49.4** | **-46.5** | **-30.8** | **-27.3** | **-23.4** | **-19.1** | **-14.2** | **-8.8** | **-2.9** | **3.0** | **8.9** | **15.4** | **22.6** | **30.6** | **39.5** | **49.3** | **60.2** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-151.6** | **13.8** | **15.9** | **18.2** | **20.8** | **23.6** | **26.8** | **30.3** | **34.2** | **38.6** | **43.4** | **48.8** | **54.8** | **60.6** | **66.5** | **73.0** | **80.2** | **88.3** | **97.1** | **107.0** | **117.9** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 10% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 5%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปลูกสร้าง | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **25.15** | **27.04** | **29.10** | **31.32** | **33.74** | **36.37** | **39.23** | **42.33** | **45.71** | **49.38** | **53.38** | **57.74** | **62.48** | **67.66** | **73.31** | **79.46** | **86.19** | **93.53** | **101.55** | **110.31** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 10.10 | 10.60 | 11.13 | 11.69 | 12.27 | 12.89 | 13.53 | 14.21 | 14.92 | 15.67 | 16.45 | 17.27 | 18.13 | 19.04 | 19.99 | 20.99 | 22.04 | 23.14 | 24.30 | 25.52 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 12.12 | 13.36 | 14.73 | 16.24 | 17.90 | 19.74 | 21.76 | 23.99 | 26.45 | 29.16 | 32.15 | 35.45 | 39.08 | 43.09 | 47.50 | 52.37 | 57.74 | 63.66 | 70.18 | 77.38 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งทางเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **8.99** | **10.56** | **12.32** | **14.28** | **16.47** | **18.90** | **21.62** | **24.65** | **28.02** | **31.77** | **35.95** | **40.59** | **45.75** | **51.49** | **57.86** | **64.94** | **72.81** | **81.53** | **91.22** | **101.97** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -61.2 | -59.6 | -57.8 | -55.9 | -53.7 | -38.7 | -36.0 | -33.0 | -29.6 | -25.9 | -21.7 | -17.1 | -11.9 | -6.2 | 0.2 | 7.3 | 15.2 | 23.9 | 33.6 | 44.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 1.46 | 3.03 | 4.78 | 6.71 | 8.86 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-61.2** | **-59.6** | **-57.8** | **-55.9** | **-53.7** | **-38.7** | **-36.0** | **-33.0** | **-29.6** | **-25.9** | **-21.7** | **-17.1** | **-11.9** | **-6.2** | **0.2** | **5.8** | **12.1** | **19.1** | **26.9** | **35.5** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-151.6** | **9.0** | **10.6** | **12.3** | **14.3** | **16.5** | **18.9** | **21.6** | **24.6** | **28.0** | **31.8** | **35.9** | **40.6** | **45.8** | **51.5** | **57.8** | **63.5** | **69.8** | **76.8** | **84.5** | **93.1** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 10% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 7%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปอลสาหร่าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **30.00** | **32.39** | **34.99** | **37.82** | **40.90** | **44.27** | **47.93** | **51.93** | **56.29** | **61.04** | **66.24** | **71.92** | **78.12** | **84.89** | **92.31** | **100.41** | **109.28** | **118.99** | **129.62** | **141.26** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 14.14 | 14.84 | 15.59 | 16.37 | 17.18 | 18.04 | 18.95 | 19.89 | 20.89 | 21.93 | 23.03 | 24.18 | 25.39 | 26.66 | 27.99 | 29.39 | 30.86 | 32.40 | 34.02 | 35.72 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 16.96 | 18.70 | 20.62 | 22.73 | 25.06 | 27.63 | 30.47 | 33.59 | 37.03 | 40.83 | 45.01 | 49.63 | 54.71 | 60.32 | 66.50 | 73.32 | 80.84 | 89.12 | 98.26 | 108.33 |
| ค่าไฟจ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าขาดคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **4.14** | **5.22** | **6.43** | **7.79** | **9.31** | **11.01** | **12.92** | **15.05** | **17.44** | **20.11** | **23.08** | **26.41** | **30.12** | **34.25** | **38.86** | **44.00** | **49.71** | **56.07** | **63.14** | **71.02** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -66.0 | -64.9 | -63.7 | -62.4 | -60.9 | -46.6 | -44.7 | -42.6 | -40.2 | -37.5 | -34.6 | -31.2 | -27.5 | -23.4 | -18.8 | -13.7 | -7.9 | -1.6 | 5.5 | 13.4 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.10 | 2.67 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-66.0** | **-64.9** | **-63.7** | **-62.4** | **-60.9** | **-46.6** | **-44.7** | **-42.6** | **-40.2** | **-37.5** | **-34.6** | **-31.2** | **-27.5** | **-23.4** | **-18.8** | **-13.7** | **-7.9** | **-1.6** | **4.4** | **10.7** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-151.6** | **4.1** | **5.2** | **6.4** | **7.8** | **9.3** | **11.0** | **12.9** | **15.1** | **17.4** | **20.1** | **23.1** | **26.4** | **30.1** | **34.3** | **38.9** | **44.0** | **49.7** | **56.1** | **62.0** | **68.3** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 10% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 10%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปอล์สาทาย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **37.27** | **40.40** | **43.83** | **47.56** | **51.65** | **56.11** | **60.99** | **66.32** | **72.16** | **78.54** | **85.53** | **93.18** | **101.56** | **110.75** | **120.81** | **131.84** | **143.93** | **157.19** | **171.73** | **187.68** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 20.20 | 21.21 | 22.27 | 23.38 | 24.55 | 25.78 | 27.06 | 28.42 | 29.84 | 31.33 | 32.90 | 34.54 | 36.27 | 38.08 | 39.99 | 41.99 | 44.09 | 46.29 | 48.60 | 51.03 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 24.24 | 26.72 | 29.46 | 32.48 | 35.81 | 39.48 | 43.52 | 47.98 | 52.90 | 58.32 | 64.30 | 70.89 | 78.16 | 86.17 | 95.01 | 104.74 | 115.48 | 127.32 | 140.37 | 154.75 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปโรงคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าขาคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **-3.13** | **-2.80** | **-2.41** | **-1.96** | **-1.44** | **-0.83** | **-0.14** | **0.66** | **1.57** | **2.61** | **3.79** | **5.14** | **6.67** | **8.40** | **10.36** | **12.57** | **15.07** | **17.88** | **21.03** | **24.59** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -73.3 | -73.0 | -72.6 | -72.1 | -71.6 | -58.5 | -57.8 | -57.0 | -56.1 | -55.0 | -53.9 | -52.5 | -51.0 | -49.2 | -47.3 | -45.1 | -42.6 | -39.8 | -36.6 | -33.1 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-73.3** | **-73.0** | **-72.6** | **-72.1** | **-71.6** | **-58.5** | **-57.8** | **-57.0** | **-56.1** | **-55.0** | **-53.9** | **-52.5** | **-51.0** | **-49.2** | **-47.3** | **-45.1** | **-42.6** | **-39.8** | **-36.6** | **-33.1** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-151.6** | **-3.1** | **-2.8** | **-2.4** | **-2.0** | **-1.4** | **-0.8** | **-0.1** | **0.7** | **1.6** | **2.6** | **3.8** | **5.1** | **6.7** | **8.4** | **10.4** | **12.6** | **15.1** | **17.9** | **21.0** | **24.6** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 20% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 3%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปลูกสร้าง | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **20.30** | **21.70** | **23.21** | **24.83** | **26.58** | **28.48** | **30.52** | **32.73** | **35.12** | **37.71** | **40.52** | **43.56** | **46.85** | **50.43** | **54.30** | **58.52** | **63.09** | **68.06** | **73.47** | **79.36** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 6.06 | 6.36 | 6.68 | 7.01 | 7.36 | 7.73 | 8.12 | 8.53 | 8.95 | 9.40 | 9.87 | 10.36 | 10.88 | 11.42 | 12.00 | 12.60 | 13.23 | 13.89 | 14.58 | 15.31 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 7.27 | 8.02 | 8.84 | 9.74 | 10.74 | 11.84 | 13.06 | 14.40 | 15.87 | 17.50 | 19.29 | 21.27 | 23.45 | 25.85 | 28.50 | 31.42 | 34.64 | 38.19 | 42.11 | 46.43 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งท่าเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าขุดลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **13.84** | **15.91** | **18.21** | **20.78** | **23.63** | **26.80** | **30.33** | **34.25** | **38.60** | **43.44** | **48.81** | **54.77** | **61.38** | **68.72** | **76.87** | **85.89** | **95.90** | **107.00** | **119.29** | **132.92** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -56.3 | -54.3 | -52.0 | -49.4 | -46.5 | -30.8 | -27.3 | -23.4 | -19.1 | -14.2 | -8.8 | -2.9 | 3.7 | 11.1 | 19.2 | 28.2 | 38.3 | 49.3 | 61.6 | 75.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.75 | 2.21 | 3.84 | 5.65 | 7.65 | 9.87 | 12.33 | 15.05 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-56.3** | **-54.3** | **-52.0** | **-49.4** | **-46.5** | **-30.8** | **-27.3** | **-23.4** | **-19.1** | **-14.2** | **-8.8** | **-2.9** | **3.0** | **8.9** | **15.4** | **22.6** | **30.6** | **39.5** | **49.3** | **60.2** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-303.1** | **13.8** | **15.9** | **18.2** | **20.8** | **23.6** | **26.8** | **30.3** | **34.2** | **38.6** | **43.4** | **48.8** | **54.8** | **60.6** | **66.5** | **73.0** | **80.2** | **88.3** | **97.1** | **107.0** | **117.9** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 20% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 5%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าก่อสร้าง | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **25.15** | **27.04** | **29.10** | **31.32** | **33.74** | **36.37** | **39.23** | **42.33** | **45.71** | **49.38** | **53.38** | **57.74** | **62.48** | **67.66** | **73.31** | **79.46** | **86.19** | **93.53** | **101.55** | **110.31** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 10.10 | 10.60 | 11.13 | 11.69 | 12.27 | 12.89 | 13.53 | 14.21 | 14.92 | 15.67 | 16.45 | 17.27 | 18.13 | 19.04 | 19.99 | 20.99 | 22.04 | 23.14 | 24.30 | 25.52 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 12.12 | 13.36 | 14.73 | 16.24 | 17.90 | 19.74 | 21.76 | 23.99 | 26.45 | 29.16 | 32.15 | 35.45 | 39.08 | 43.09 | 47.50 | 52.37 | 57.74 | 63.66 | 70.18 | 77.38 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าขาคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **8.99** | **10.56** | **12.32** | **14.28** | **16.47** | **18.90** | **21.62** | **24.65** | **28.02** | **31.77** | **35.95** | **40.59** | **45.75** | **51.49** | **57.86** | **64.94** | **72.81** | **81.53** | **91.22** | **101.97** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -61.2 | -59.6 | -57.8 | -55.9 | -53.7 | -38.7 | -36.0 | -33.0 | -29.6 | -25.9 | -21.7 | -17.1 | -11.9 | -6.2 | 0.2 | 7.3 | 15.2 | 23.9 | 33.6 | 44.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 1.46 | 3.03 | 4.78 | 6.71 | 8.86 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-61.2** | **-59.6** | **-57.8** | **-55.9** | **-53.7** | **-38.7** | **-36.0** | **-33.0** | **-29.6** | **-25.9** | **-21.7** | **-17.1** | **-11.9** | **-6.2** | **0.2** | **5.8** | **12.1** | **19.1** | **26.9** | **35.5** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-303.1** | **9.0** | **10.6** | **12.3** | **14.3** | **16.5** | **18.9** | **21.6** | **24.6** | **28.0** | **31.8** | **35.9** | **40.6** | **45.8** | **51.5** | **57.8** | **63.5** | **69.8** | **76.8** | **84.5** | **93.1** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 20% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 7%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปอลาฟาย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **30.00** | **32.39** | **34.99** | **37.82** | **40.90** | **44.27** | **47.93** | **51.93** | **56.29** | **61.04** | **66.24** | **71.92** | **78.12** | **84.89** | **92.31** | **100.41** | **109.28** | **118.99** | **129.62** | **141.26** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 14.14 | 14.84 | 15.59 | 16.37 | 17.18 | 18.04 | 18.95 | 19.89 | 20.89 | 21.93 | 23.03 | 24.18 | 25.39 | 26.66 | 27.99 | 29.39 | 30.86 | 32.40 | 34.02 | 35.72 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 16.96 | 18.70 | 20.62 | 22.73 | 25.06 | 27.63 | 30.47 | 33.59 | 37.03 | 40.83 | 45.01 | 49.63 | 54.71 | 60.32 | 66.50 | 73.32 | 80.84 | 89.12 | 98.26 | 108.33 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **4.14** | **5.22** | **6.43** | **7.79** | **9.31** | **11.01** | **12.92** | **15.05** | **17.44** | **20.11** | **23.08** | **26.41** | **30.12** | **34.25** | **38.86** | **44.00** | **49.71** | **56.07** | **63.14** | **71.02** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -66.0 | -64.9 | -63.7 | -62.4 | -60.9 | -46.6 | -44.7 | -42.6 | -40.2 | -37.5 | -34.6 | -31.2 | -27.5 | -23.4 | -18.8 | -13.7 | -7.9 | -1.6 | 5.5 | 13.4 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.10 | 2.67 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-66.0** | **-64.9** | **-63.7** | **-62.4** | **-60.9** | **-46.6** | **-44.7** | **-42.6** | **-40.2** | **-37.5** | **-34.6** | **-31.2** | **-27.5** | **-23.4** | **-18.8** | **-13.7** | **-7.9** | **-1.6** | **4.4** | **10.7** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-303.1** | **4.1** | **5.2** | **6.4** | **7.8** | **9.3** | **11.0** | **12.9** | **15.1** | **17.4** | **20.1** | **23.1** | **26.4** | **30.1** | **34.3** | **38.9** | **44.0** | **49.7** | **56.1** | **62.0** | **68.3** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 20% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 10%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าเผลาพร้าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **37.27** | **40.40** | **43.83** | **47.56** | **51.65** | **56.11** | **60.99** | **66.32** | **72.16** | **78.54** | **85.53** | **93.18** | **101.56** | **110.75** | **120.81** | **131.84** | **143.93** | **157.19** | **171.73** | **187.68** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 20.20 | 21.21 | 22.27 | 23.38 | 24.55 | 25.78 | 27.06 | 28.42 | 29.84 | 31.33 | 32.90 | 34.54 | 36.27 | 38.08 | 39.99 | 41.99 | 44.09 | 46.29 | 48.60 | 51.03 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 24.24 | 26.72 | 29.46 | 32.48 | 35.81 | 39.48 | 43.52 | 47.98 | 52.90 | 58.32 | 64.30 | 70.89 | 78.16 | 86.17 | 95.01 | 104.74 | 115.48 | 127.32 | 140.37 | 154.75 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งท่าเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **-3.13** | **-2.80** | **-2.41** | **-1.96** | **-1.44** | **-0.83** | **-0.14** | **0.66** | **1.57** | **2.61** | **3.79** | **5.14** | **6.67** | **8.40** | **10.36** | **12.57** | **15.07** | **17.88** | **21.03** | **24.59** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -73.3 | -73.0 | -72.6 | -72.1 | -71.6 | -58.5 | -57.8 | -57.0 | -56.1 | -55.0 | -53.9 | -52.5 | -51.0 | -49.2 | -47.3 | -45.1 | -42.6 | -39.8 | -36.6 | -33.1 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-73.3** | **-73.0** | **-72.6** | **-72.1** | **-71.6** | **-58.5** | **-57.8** | **-57.0** | **-56.1** | **-55.0** | **-53.9** | **-52.5** | **-51.0** | **-49.2** | **-47.3** | **-45.1** | **-42.6** | **-39.8** | **-36.6** | **-33.1** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-303.1** | **-3.1** | **-2.8** | **-2.4** | **-2.0** | **-1.4** | **-0.8** | **-0.1** | **0.7** | **1.6** | **2.6** | **3.8** | **5.1** | **6.7** | **8.4** | **10.4** | **12.6** | **15.1** | **17.9** | **21.0** | **24.6** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 30% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 3%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปอลสาพราย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **20.30** | **21.70** | **23.21** | **24.83** | **26.58** | **28.48** | **30.52** | **32.73** | **35.12** | **37.71** | **40.52** | **43.56** | **46.85** | **50.43** | **54.30** | **58.52** | **63.09** | **68.06** | **73.47** | **79.36** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 6.06 | 6.36 | 6.68 | 7.01 | 7.36 | 7.73 | 8.12 | 8.53 | 8.95 | 9.40 | 9.87 | 10.36 | 10.88 | 11.42 | 12.00 | 12.60 | 13.23 | 13.89 | 14.58 | 15.31 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 7.27 | 8.02 | 8.84 | 9.74 | 10.74 | 11.84 | 13.06 | 14.40 | 15.87 | 17.50 | 19.29 | 21.27 | 23.45 | 25.85 | 28.50 | 31.42 | 34.64 | 38.19 | 42.11 | 46.43 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งท่าเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **13.84** | **15.91** | **18.21** | **20.78** | **23.63** | **26.80** | **30.33** | **34.25** | **38.60** | **43.44** | **48.81** | **54.77** | **61.38** | **68.72** | **76.87** | **85.89** | **95.90** | **107.00** | **119.29** | **132.92** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -56.3 | -54.3 | -52.0 | -49.4 | -46.5 | -30.8 | -27.3 | -23.4 | -19.1 | -14.2 | -8.8 | -2.9 | 3.7 | 11.1 | 19.2 | 28.2 | 38.3 | 49.3 | 61.6 | 75.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.75 | 2.21 | 3.84 | 5.65 | 7.65 | 9.87 | 12.33 | 15.05 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-56.3** | **-54.3** | **-52.0** | **-49.4** | **-46.5** | **-30.8** | **-27.3** | **-23.4** | **-19.1** | **-14.2** | **-8.8** | **-2.9** | **3.0** | **8.9** | **15.4** | **22.6** | **30.6** | **39.5** | **49.3** | **60.2** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-454.7** | **13.8** | **15.9** | **18.2** | **20.8** | **23.6** | **26.8** | **30.3** | **34.2** | **38.6** | **43.4** | **48.8** | **54.8** | **60.6** | **66.5** | **73.0** | **80.2** | **88.3** | **97.1** | **107.0** | **117.9** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 30% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 5%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปอสร้างท่าเรือ | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **25.15** | **27.04** | **29.10** | **31.32** | **33.74** | **36.37** | **39.23** | **42.33** | **45.71** | **49.38** | **53.38** | **57.74** | **62.48** | **67.66** | **73.31** | **79.46** | **86.19** | **93.53** | **101.55** | **110.31** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 10.10 | 10.60 | 11.13 | 11.69 | 12.27 | 12.89 | 13.53 | 14.21 | 14.92 | 15.67 | 16.45 | 17.27 | 18.13 | 19.04 | 19.99 | 20.99 | 22.04 | 23.14 | 24.30 | 25.52 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 12.12 | 13.36 | 14.73 | 16.24 | 17.90 | 19.74 | 21.76 | 23.99 | 26.45 | 29.16 | 32.15 | 35.45 | 39.08 | 43.09 | 47.50 | 52.37 | 57.74 | 63.66 | 70.18 | 77.38 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าขาคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **8.99** | **10.56** | **12.32** | **14.28** | **16.47** | **18.90** | **21.62** | **24.65** | **28.02** | **31.77** | **35.95** | **40.59** | **45.75** | **51.49** | **57.86** | **64.94** | **72.81** | **81.53** | **91.22** | **101.97** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -61.2 | -59.6 | -57.8 | -55.9 | -53.7 | -38.7 | -36.0 | -33.0 | -29.6 | -25.9 | -21.7 | -17.1 | -11.9 | -6.2 | 0.2 | 7.3 | 15.2 | 23.9 | 33.6 | 44.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 1.46 | 3.03 | 4.78 | 6.71 | 8.86 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-61.2** | **-59.6** | **-57.8** | **-55.9** | **-53.7** | **-38.7** | **-36.0** | **-33.0** | **-29.6** | **-25.9** | **-21.7** | **-17.1** | **-11.9** | **-6.2** | **0.2** | **5.8** | **12.1** | **19.1** | **26.9** | **35.5** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-454.7** | **9.0** | **10.6** | **12.3** | **14.3** | **16.5** | **18.9** | **21.6** | **24.6** | **28.0** | **31.8** | **35.9** | **40.6** | **45.8** | **51.5** | **57.8** | **63.5** | **69.8** | **76.8** | **84.5** | **93.1** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 30% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 7%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบ่อสาธารณ | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านเลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **30.00** | **32.39** | **34.99** | **37.82** | **40.90** | **44.27** | **47.93** | **51.93** | **56.29** | **61.04** | **66.24** | **71.92** | **78.12** | **84.89** | **92.31** | **100.41** | **109.28** | **118.99** | **129.62** | **141.26** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 14.14 | 14.84 | 15.59 | 16.37 | 17.18 | 18.04 | 18.95 | 19.89 | 20.89 | 21.93 | 23.03 | 24.18 | 25.39 | 26.66 | 27.99 | 29.39 | 30.86 | 32.40 | 34.02 | 35.72 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 16.96 | 18.70 | 20.62 | 22.73 | 25.06 | 27.63 | 30.47 | 33.59 | 37.03 | 40.83 | 45.01 | 49.63 | 54.71 | 60.32 | 66.50 | 73.32 | 80.84 | 89.12 | 98.26 | 108.33 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งท่าเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **4.14** | **5.22** | **6.43** | **7.79** | **9.31** | **11.01** | **12.92** | **15.05** | **17.44** | **20.11** | **23.08** | **26.41** | **30.12** | **34.25** | **38.86** | **44.00** | **49.71** | **56.07** | **63.14** | **71.02** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -66.0 | -64.9 | -63.7 | -62.4 | -60.9 | -46.6 | -44.7 | -42.6 | -40.2 | -37.5 | -34.6 | -31.2 | -27.5 | -23.4 | -18.8 | -13.7 | -7.9 | -1.6 | 5.5 | 13.4 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.10 | 2.67 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-66.0** | **-64.9** | **-63.7** | **-62.4** | **-60.9** | **-46.6** | **-44.7** | **-42.6** | **-40.2** | **-37.5** | **-34.6** | **-31.2** | **-27.5** | **-23.4** | **-18.8** | **-13.7** | **-7.9** | **-1.6** | **4.4** | **10.7** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-454.7** | **4.1** | **5.2** | **6.4** | **7.8** | **9.3** | **11.0** | **12.9** | **15.1** | **17.4** | **20.1** | **23.1** | **26.4** | **30.1** | **34.3** | **38.9** | **44.0** | **49.7** | **56.1** | **62.0** | **68.3** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 30% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 10%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบ่อสาทร่าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **37.27** | **40.40** | **43.83** | **47.56** | **51.65** | **56.11** | **60.99** | **66.32** | **72.16** | **78.54** | **85.53** | **93.18** | **101.56** | **110.75** | **120.81** | **131.84** | **143.93** | **157.19** | **171.73** | **187.68** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 20.20 | 21.21 | 22.27 | 23.38 | 24.55 | 25.78 | 27.06 | 28.42 | 29.84 | 31.33 | 32.90 | 34.54 | 36.27 | 38.08 | 39.99 | 41.99 | 44.09 | 46.29 | 48.60 | 51.03 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 24.24 | 26.72 | 29.46 | 32.48 | 35.81 | 39.48 | 43.52 | 47.98 | 52.90 | 58.32 | 64.30 | 70.89 | 78.16 | 86.17 | 95.01 | 104.74 | 115.48 | 127.32 | 140.37 | 154.75 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **-3.13** | **-2.80** | **-2.41** | **-1.96** | **-1.44** | **-0.83** | **-0.14** | **0.66** | **1.57** | **2.61** | **3.79** | **5.14** | **6.67** | **8.40** | **10.36** | **12.57** | **15.07** | **17.88** | **21.03** | **24.59** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -73.3 | -73.0 | -72.6 | -72.1 | -71.6 | -58.5 | -57.8 | -57.0 | -56.1 | -55.0 | -53.9 | -52.5 | -51.0 | -49.2 | -47.3 | -45.1 | -42.6 | -39.8 | -36.6 | -33.1 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-73.3** | **-73.0** | **-72.6** | **-72.1** | **-71.6** | **-58.5** | **-57.8** | **-57.0** | **-56.1** | **-55.0** | **-53.9** | **-52.5** | **-51.0** | **-49.2** | **-47.3** | **-45.1** | **-42.6** | **-39.8** | **-36.6** | **-33.1** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-454.7** | **-3.1** | **-2.8** | **-2.4** | **-2.0** | **-1.4** | **-0.8** | **-0.1** | **0.7** | **1.6** | **2.6** | **3.8** | **5.1** | **6.7** | **8.4** | **10.4** | **12.6** | **15.1** | **17.9** | **21.0** | **24.6** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 40% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 3%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปอลาพาร์ย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **20.30** | **21.70** | **23.21** | **24.83** | **26.58** | **28.48** | **30.52** | **32.73** | **35.12** | **37.71** | **40.52** | **43.56** | **46.85** | **50.43** | **54.30** | **58.52** | **63.09** | **68.06** | **73.47** | **79.36** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 6.06 | 6.36 | 6.68 | 7.01 | 7.36 | 7.73 | 8.12 | 8.53 | 8.95 | 9.40 | 9.87 | 10.36 | 10.88 | 11.42 | 12.00 | 12.60 | 13.23 | 13.89 | 14.58 | 15.31 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 7.27 | 8.02 | 8.84 | 9.74 | 10.74 | 11.84 | 13.06 | 14.40 | 15.87 | 17.50 | 19.29 | 21.27 | 23.45 | 25.85 | 28.50 | 31.42 | 34.64 | 38.19 | 42.11 | 46.43 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งทางเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **13.84** | **15.91** | **18.21** | **20.78** | **23.63** | **26.80** | **30.33** | **34.25** | **38.60** | **43.44** | **48.81** | **54.77** | **61.38** | **68.72** | **76.87** | **85.89** | **95.90** | **107.00** | **119.29** | **132.92** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -56.3 | -54.3 | -52.0 | -49.4 | -46.5 | -30.8 | -27.3 | -23.4 | -19.1 | -14.2 | -8.8 | -2.9 | 3.7 | 11.1 | 19.2 | 28.2 | 38.3 | 49.3 | 61.6 | 75.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.75 | 2.21 | 3.84 | 5.65 | 7.65 | 9.87 | 12.33 | 15.05 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-56.3** | **-54.3** | **-52.0** | **-49.4** | **-46.5** | **-30.8** | **-27.3** | **-23.4** | **-19.1** | **-14.2** | **-8.8** | **-2.9** | **3.0** | **8.9** | **15.4** | **22.6** | **30.6** | **39.5** | **49.3** | **60.2** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-606.2** | **13.8** | **15.9** | **18.2** | **20.8** | **23.6** | **26.8** | **30.3** | **34.2** | **38.6** | **43.4** | **48.8** | **54.8** | **60.6** | **66.5** | **73.0** | **80.2** | **88.3** | **97.1** | **107.0** | **117.9** |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 40% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 5%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปลูกสร้าง | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **25.15** | **27.04** | **29.10** | **31.32** | **33.74** | **36.37** | **39.23** | **42.33** | **45.71** | **49.38** | **53.38** | **57.74** | **62.48** | **67.66** | **73.31** | **79.46** | **86.19** | **93.53** | **101.55** | **110.31** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 10.10 | 10.60 | 11.13 | 11.69 | 12.27 | 12.89 | 13.53 | 14.21 | 14.92 | 15.67 | 16.45 | 17.27 | 18.13 | 19.04 | 19.99 | 20.99 | 22.04 | 23.14 | 24.30 | 25.52 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 12.12 | 13.36 | 14.73 | 16.24 | 17.90 | 19.74 | 21.76 | 23.99 | 26.45 | 29.16 | 32.15 | 35.45 | 39.08 | 43.09 | 47.50 | 52.37 | 57.74 | 63.66 | 70.18 | 77.38 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **8.99** | **10.56** | **12.32** | **14.28** | **16.47** | **18.90** | **21.62** | **24.65** | **28.02** | **31.77** | **35.95** | **40.59** | **45.75** | **51.49** | **57.86** | **64.94** | **72.81** | **81.53** | **91.22** | **101.97** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -61.2 | -59.6 | -57.8 | -55.9 | -53.7 | -38.7 | -36.0 | -33.0 | -29.6 | -25.9 | -21.7 | -17.1 | -11.9 | -6.2 | 0.2 | 7.3 | 15.2 | 23.9 | 33.6 | 44.3 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 1.46 | 3.03 | 4.78 | 6.71 | 8.86 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-61.2** | **-59.6** | **-57.8** | **-55.9** | **-53.7** | **-38.7** | **-36.0** | **-33.0** | **-29.6** | **-25.9** | **-21.7** | **-17.1** | **-11.9** | **-6.2** | **0.2** | **5.8** | **12.1** | **19.1** | **26.9** | **35.5** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-606.2** | **9.0** | **10.6** | **12.3** | **14.3** | **16.5** | **18.9** | **21.6** | **24.6** | **28.0** | **31.8** | **35.9** | **40.6** | **45.8** | **51.5** | **57.8** | **63.5** | **69.8** | **76.8** | **84.5** | **93.1** |

**Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 40% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 7%**

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบ่อสาหร่าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **30.00** | **32.39** | **34.99** | **37.82** | **40.90** | **44.27** | **47.93** | **51.93** | **56.29** | **61.04** | **66.24** | **71.92** | **78.12** | **84.89** | **92.31** | **100.41** | **109.28** | **118.99** | **129.62** | **141.26** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 14.14 | 14.84 | 15.59 | 16.37 | 17.18 | 18.04 | 18.95 | 19.89 | 20.89 | 21.93 | 23.03 | 24.18 | 25.39 | 26.66 | 27.99 | 29.39 | 30.86 | 32.40 | 34.02 | 35.72 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 16.96 | 18.70 | 20.62 | 22.73 | 25.06 | 27.63 | 30.47 | 33.59 | 37.03 | 40.83 | 45.01 | 49.63 | 54.71 | 60.32 | 66.50 | 73.32 | 80.84 | 89.12 | 98.26 | 108.33 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งท่าเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าขนส่งน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **4.14** | **5.22** | **6.43** | **7.79** | **9.31** | **11.01** | **12.92** | **15.05** | **17.44** | **20.11** | **23.08** | **26.41** | **30.12** | **34.25** | **38.86** | **44.00** | **49.71** | **56.07** | **63.14** | **71.02** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -66.0 | -64.9 | -63.7 | -62.4 | -60.9 | -46.6 | -44.7 | -42.6 | -40.2 | -37.5 | -34.6 | -31.2 | -27.5 | -23.4 | -18.8 | -13.7 | -7.9 | -1.6 | 5.5 | 13.4 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.10 | 2.67 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-66.0** | **-64.9** | **-63.7** | **-62.4** | **-60.9** | **-46.6** | **-44.7** | **-42.6** | **-40.2** | **-37.5** | **-34.6** | **-31.2** | **-27.5** | **-23.4** | **-18.8** | **-13.7** | **-7.9** | **-1.6** | **4.4** | **10.7** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-606.2** | **4.1** | **5.2** | **6.4** | **7.8** | **9.3** | **11.0** | **12.9** | **15.1** | **17.4** | **20.1** | **23.1** | **26.4** | **30.1** | **34.3** | **38.9** | **44.0** | **49.7** | **56.1** | **62.0** | **68.3** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีการลงทุนเริ่มต้นลดลงเหลือ 40% และต้นทุนการผลิตทางตรงลดลงเหลือ 10%

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าน่อสร้าง | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **34.14** | **37.61** | **41.42** | **45.61** | **50.21** | **55.28** | **60.85** | **66.98** | **73.72** | **81.15** | **89.32** | **98.32** | **108.23** | **119.15** | **131.17** | **144.41** | **158.99** | **175.06** | **192.76** | **212.28** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 27.21 | 28.57 | 30.00 | 31.50 | 33.07 | 34.73 | 36.46 | 38.29 | 40.20 | 42.21 | 44.32 | 46.54 | 48.87 | 51.31 | 53.87 | 56.57 | 59.40 | 62.37 | 65.48 | 68.76 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **37.27** | **40.40** | **43.83** | **47.56** | **51.65** | **56.11** | **60.99** | **66.32** | **72.16** | **78.54** | **85.53** | **93.18** | **101.56** | **110.75** | **120.81** | **131.84** | **143.93** | **157.19** | **171.73** | **187.68** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 20.20 | 21.21 | 22.27 | 23.38 | 24.55 | 25.78 | 27.06 | 28.42 | 29.84 | 31.33 | 32.90 | 34.54 | 36.27 | 38.08 | 39.99 | 41.99 | 44.09 | 46.29 | 48.60 | 51.03 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 24.24 | 26.72 | 29.46 | 32.48 | 35.81 | 39.48 | 43.52 | 47.98 | 52.90 | 58.32 | 64.30 | 70.89 | 78.16 | 86.17 | 95.01 | 104.74 | 115.48 | 127.32 | 140.37 | 154.75 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **-3.13** | **-2.80** | **-2.41** | **-1.96** | **-1.44** | **-0.83** | **-0.14** | **0.66** | **1.57** | **2.61** | **3.79** | **5.14** | **6.67** | **8.40** | **10.36** | **12.57** | **15.07** | **17.88** | **21.03** | **24.59** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | -73.3 | -73.0 | -72.6 | -72.1 | -71.6 | -58.5 | -57.8 | -57.0 | -56.1 | -55.0 | -53.9 | -52.5 | -51.0 | -49.2 | -47.3 | -45.1 | -42.6 | -39.8 | -36.6 | -33.1 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **-73.3** | **-73.0** | **-72.6** | **-72.1** | **-71.6** | **-58.5** | **-57.8** | **-57.0** | **-56.1** | **-55.0** | **-53.9** | **-52.5** | **-51.0** | **-49.2** | **-47.3** | **-45.1** | **-42.6** | **-39.8** | **-36.6** | **-33.1** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-606.2** | **-3.1** | **-2.8** | **-2.4** | **-2.0** | **-1.4** | **-0.8** | **-0.1** | **0.7** | **1.6** | **2.6** | **3.8** | **5.1** | **6.7** | **8.4** | **10.4** | **12.6** | **15.1** | **17.9** | **21.0** | **24.6** |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีราคาขาย MLB20 เท่ากับ 290 บาท/ลิตร

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบ่อสาทร่าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **349.49** | **385.28** | **424.73** | **468.20** | **516.12** | **568.94** | **627.17** | **691.35** | **762.09** | **840.07** | **926.04** | **1020.80** | **1125.26** | **1240.42** | **1367.37** | **1507.32** | **1661.61** | **1831.69** | **2019.20** | **2225.93** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 290.00 | 304.50 | 319.73 | 335.71 | 352.50 | 370.12 | 388.63 | 408.06 | 428.46 | 449.89 | 472.38 | 496.00 | 520.80 | 546.84 | 574.18 | 602.89 | 633.03 | 664.69 | 697.92 | 732.82 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **255.38** | **280.88** | **308.95** | **339.86** | **373.90** | **411.40** | **452.69** | **498.18** | **548.28** | **603.47** | **664.26** | **731.23** | **805.01** | **886.30** | **975.85** | **1074.52** | **1183.24** | **1303.03** | **1435.02** | **1580.46** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 201.96 | 212.06 | 222.66 | 233.79 | 245.48 | 257.76 | 270.65 | 284.18 | 298.39 | 313.31 | 328.97 | 345.42 | 362.69 | 380.83 | 399.87 | 419.86 | 440.85 | 462.90 | 486.04 | 510.34 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 242.35 | 267.19 | 294.58 | 324.77 | 358.06 | 394.77 | 435.23 | 479.84 | 529.02 | 583.25 | 643.03 | 708.94 | 781.61 | 861.72 | 950.05 | 1047.43 | 1154.79 | 1273.16 | 1403.66 | 1547.53 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **94.11** | **104.40** | **115.78** | **128.34** | **142.22** | **157.55** | **174.47** | **193.17** | **213.81** | **236.61** | **261.78** | **289.57** | **320.25** | **354.12** | **391.52** | **432.80** | **478.37** | **528.67** | **584.18** | **645.46** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | 23.9 | 34.2 | 45.6 | 58.2 | 72.0 | 99.9 | 116.8 | 135.5 | 156.2 | 179.0 | 204.1 | 231.9 | 262.6 | 296.5 | 333.9 | 375.2 | 420.7 | 471.0 | 526.5 | 587.8 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 4.79 | 6.85 | 9.12 | 11.63 | 14.41 | 19.98 | 23.36 | 27.10 | 31.23 | 35.79 | 40.83 | 46.38 | 52.52 | 59.29 | 66.77 | 75.03 | 84.14 | 94.20 | 105.31 | 117.56 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **19.1** | **27.4** | **36.5** | **46.5** | **57.6** | **79.9** | **93.5** | **108.4** | **124.9** | **143.2** | **163.3** | **185.5** | **210.1** | **237.2** | **267.1** | **300.1** | **336.6** | **376.8** | **421.2** | **470.2** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-1515.6** | **89.3** | **97.6** | **106.7** | **116.7** | **127.8** | **137.6** | **151.1** | **166.1** | **182.6** | **200.8** | **221.0** | **243.2** | **267.7** | **294.8** | **324.7** | **357.8** | **394.2** | **434.5** | **478.9** | **527.9** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีราคาขาย MLB20 เท่ากับ 300 บาท/ลิตร

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าบลสาทราย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **361.49** | **398.51** | **439.31** | **484.28** | **533.85** | **588.49** | **648.72** | **715.10** | **788.28** | **868.95** | **957.88** | **1055.90** | **1163.96** | **1283.09** | **1414.42** | **1559.19** | **1718.79** | **1894.73** | **2088.70** | **2302.55** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 300.00 | 315.00 | 330.75 | 347.29 | 364.65 | 382.88 | 402.03 | 422.13 | 443.24 | 465.40 | 488.67 | 513.10 | 538.76 | 565.69 | 593.98 | 623.68 | 654.86 | 687.61 | 721.99 | 758.09 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **255.38** | **280.88** | **308.95** | **339.86** | **373.90** | **411.40** | **452.69** | **498.18** | **548.28** | **603.47** | **664.26** | **731.23** | **805.01** | **886.30** | **975.85** | **1074.52** | **1183.24** | **1303.03** | **1435.02** | **1580.46** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 201.96 | 212.06 | 222.66 | 233.79 | 245.48 | 257.76 | 270.65 | 284.18 | 298.39 | 313.31 | 328.97 | 345.42 | 362.69 | 380.83 | 399.87 | 419.86 | 440.85 | 462.90 | 486.04 | 510.34 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 242.35 | 267.19 | 294.58 | 324.77 | 358.06 | 394.77 | 435.23 | 479.84 | 529.02 | 583.25 | 643.03 | 708.94 | 781.61 | 861.72 | 950.05 | 1047.43 | 1154.79 | 1273.16 | 1403.66 | 1547.53 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **106.11** | **117.63** | **130.36** | **144.42** | **159.95** | **177.09** | **196.02** | **216.93** | **240.01** | **265.49** | **293.62** | **324.67** | **358.95** | **396.79** | **438.56** | **484.66** | **535.55** | **591.71** | **653.68** | **722.09** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | 35.9 | 47.5 | 60.2 | 74.3 | 89.8 | 119.4 | 138.4 | 159.3 | 182.4 | 207.8 | 236.0 | 267.0 | 301.3 | 339.1 | 380.9 | 427.0 | 477.9 | 534.1 | 596.0 | 664.4 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 7.19 | 9.49 | 12.04 | 14.85 | 17.96 | 23.89 | 27.67 | 31.86 | 36.47 | 41.57 | 47.19 | 53.40 | 60.26 | 67.83 | 76.18 | 85.40 | 95.58 | 106.81 | 119.21 | 132.89 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **28.7** | **38.0** | **48.2** | **59.4** | **71.8** | **95.6** | **110.7** | **127.4** | **145.9** | **166.3** | **188.8** | **213.6** | **241.0** | **271.3** | **304.7** | **341.6** | **382.3** | **427.2** | **476.8** | **531.5** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-1515.6** | **98.9** | **108.1** | **118.3** | **129.6** | **142.0** | **153.2** | **168.3** | **185.1** | **203.5** | **223.9** | **246.4** | **271.3** | **298.7** | **329.0** | **362.4** | **399.3** | **440.0** | **484.9** | **534.5** | **589.2** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีราคาขาย MLB20 เท่ากับ 310 บาท/ลิตร

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปล่องทิ้ง | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **373.49** | **411.74** | **453.90** | **500.36** | **551.58** | **608.04** | **670.27** | **738.86** | **814.48** | **897.83** | **989.72** | **1091.01** | **1202.67** | **1325.76** | **1461.46** | **1611.05** | **1775.97** | **1957.77** | **2158.20** | **2379.18** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 310.00 | 325.50 | 341.78 | 358.86 | 376.81 | 395.65 | 415.43 | 436.20 | 458.01 | 480.91 | 504.96 | 530.21 | 556.72 | 584.55 | 613.78 | 644.47 | 676.69 | 710.53 | 746.05 | 783.35 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **255.38** | **280.88** | **308.95** | **339.86** | **373.90** | **411.40** | **452.69** | **498.18** | **548.28** | **603.47** | **664.26** | **731.23** | **805.01** | **886.30** | **975.85** | **1074.52** | **1183.24** | **1303.03** | **1435.02** | **1580.46** |
| ต้นทุนการผลิตทางตรง | บาท/ลิตร | | 201.96 | 212.06 | 222.66 | 233.79 | 245.48 | 257.76 | 270.65 | 284.18 | 298.39 | 313.31 | 328.97 | 345.42 | 362.69 | 380.83 | 399.87 | 419.86 | 440.85 | 462.90 | 486.04 | 510.34 |
| ต้นทุนในการผลิตทางตรง | ล้านบาท | | 242.35 | 267.19 | 294.58 | 324.77 | 358.06 | 394.77 | 435.23 | 479.84 | 529.02 | 583.25 | 643.03 | 708.94 | 781.61 | 861.72 | 950.05 | 1047.43 | 1154.79 | 1273.16 | 1403.66 | 1547.53 |
| ค่าใช้จ่ายในการผลิต | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| ค่าเช่าคลังน้ำมัน | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **118.11** | **130.86** | **144.95** | **160.50** | **177.68** | **196.64** | **217.57** | **240.69** | **266.20** | **294.37** | **325.46** | **359.77** | **397.65** | **439.46** | **485.60** | **536.53** | **592.73** | **654.75** | **723.18** | **798.71** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | 47.9 | 60.7 | 74.8 | 90.3 | 107.5 | 139.0 | 159.9 | 183.0 | 208.6 | 236.7 | 267.8 | 302.1 | 340.0 | 381.8 | 428.0 | 478.9 | 535.1 | 597.1 | 665.5 | 741.1 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 9.59 | 12.14 | 14.96 | 18.07 | 21.50 | 27.80 | 31.98 | 36.61 | 41.71 | 47.34 | 53.56 | 60.42 | 68.00 | 76.36 | 85.59 | 95.78 | 107.02 | 119.42 | 133.11 | 148.21 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **38.3** | **48.6** | **59.8** | **72.3** | **86.0** | **111.2** | **127.9** | **146.4** | **166.8** | **189.4** | **214.2** | **241.7** | **272.0** | **305.4** | **342.4** | **383.1** | **428.1** | **477.7** | **532.4** | **592.9** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-1515.6** | **108.5** | **118.7** | **130.0** | **142.4** | **156.2** | **168.8** | **185.6** | **204.1** | **224.5** | **247.0** | **271.9** | **299.3** | **329.7** | **363.1** | **400.0** | **440.8** | **485.7** | **535.3** | **590.1** | **650.5** |

Sensitivity Analysis โครงการผลิต MLB20 กรณีราคาขาย MLB20 เท่ากับ 320 บาท/ลิตร

| รายละเอียด | หน่วย | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
| **ต้นทุนการผลิตทางตรง** | บาท/ลิตร | | 201.96 | 212.06 | 222.66 | 233.79 | 245.48 | 257.76 | 270.65 | 284.18 | 298.39 | 313.31 | 328.97 | 345.42 | 362.69 | 380.83 | 399.87 | 419.86 | 440.85 | 462.90 | 486.04 | 510.34 |
| **ต้นทุนในการผลิตทางตรง** | ล้านบาท | | 242.35 | 267.19 | 294.58 | 324.77 | 358.06 | 394.77 | 435.23 | 479.84 | 529.02 | 583.25 | 643.03 | 708.94 | 781.61 | 861.72 | 950.05 | 1047.43 | 1154.79 | 1273.16 | 1403.66 | 1547.53 |
| **ค่าใช้จ่ายในการผลิต** | ล้านบาท | | 11.88 | 12.47 | 13.10 | 13.75 | 14.44 | 15.16 | 15.92 | 16.72 | 17.55 | 18.43 | 19.35 | 20.32 | 21.33 | 22.40 | 23.52 | 24.70 | 25.93 | 27.23 | 28.59 | 30.02 |
| **ค่าขนส่ง MLB ไปยังคลัง** | ล้านบาท | | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.83 | 0.87 | 0.91 |
| **ค่าขนส่งผ่านเรือ Barge** | ล้านบาท | | 0.31 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.56 | 0.59 | 0.62 | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.75 | 0.79 |
| **ค่าน้ำคลังน้ำมัน** | ล้านบาท | | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.56 | 0.58 | 0.61 | 0.64 | 0.68 | 0.71 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.16 | 1.21 |
| **EBITDA** | ล้านบาท | | **130.11** | **144.09** | **159.54** | **176.58** | **195.41** | **216.19** | **239.12** | **264.45** | **292.39** | **323.24** | **357.30** | **394.88** | **436.35** | **482.13** | **532.64** | **588.39** | **649.91** | **717.79** | **792.69** | **875.34** |
| **Depreciation** | ล้านบาท | | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 70.2 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 | 57.7 |
| **EBIT** | ล้านบาท | | 59.9 | 73.9 | 89.4 | 106.4 | 125.2 | 158.5 | 181.5 | 206.8 | 234.7 | 265.6 | 299.6 | 337.2 | 378.7 | 424.5 | 475.0 | 530.7 | 592.3 | 660.1 | 735.0 | 817.7 |
| **Tax (20%)** | ล้านบาท | | 11.99 | 14.78 | 17.87 | 21.28 | 25.05 | 31.71 | 36.29 | 41.36 | 46.95 | 53.12 | 59.93 | 67.45 | 75.74 | 84.90 | 95.00 | 106.15 | 118.45 | 132.03 | 147.01 | 163.54 |
| **Net Operating Profit** | ล้านบาท | | **47.9** | **59.1** | **71.5** | **85.1** | **100.2** | **126.8** | **145.2** | **165.4** | **187.8** | **212.5** | **239.7** | **269.8** | **303.0** | **339.6** | **380.0** | **424.6** | **473.8** | **528.1** | **588.0** | **654.2** |
| **Net Cash Flows** | ล้านบาท | **-1515.6** | **118.1** | **129.3** | **141.7** | **155.3** | **170.4** | **184.5** | **202.8** | **223.1** | **245.4** | **270.1** | **297.4** | **327.4** | **360.6** | **397.2** | **437.6** | **482.2** | **531.5** | **585.8** | **645.7** | **711.8** |
| **ค่าลงทุน** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ที่ดิน | ล้านบาท | -300.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าปลูสร้างร้าย | ล้านบาท | -1130.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| อาคาร | ล้านบาท | -23.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| เครื่องจักรและอุปกรณ์ | ล้านบาท | -62.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **รายได้** | ล้านบาท | | **385.49** | **424.97** | **468.48** | **516.45** | **569.31** | **627.58** | **691.82** | **762.62** | **840.67** | **926.71** | **####** | **1126.11** | **1241.37** | **1368.43** | **1508.50** | **1662.91** | **1833.15** | **2020.81** | **2227.71** | **2455.80** |
| ยอดขาย | ล้านลิตร | | 1.20 | 1.26 | 1.32 | 1.39 | 1.46 | 1.53 | 1.61 | 1.69 | 1.77 | 1.86 | 1.95 | 2.05 | 2.16 | 2.26 | 2.38 | 2.49 | 2.62 | 2.75 | 2.89 | 3.03 |
| ราคาขาย | บาท/ลิตร | | 320.00 | 336.00 | 352.80 | 370.44 | 388.96 | 408.41 | 428.83 | 450.27 | 472.79 | 496.43 | 521.25 | 547.31 | 574.67 | 603.41 | 633.58 | 665.26 | 698.52 | 733.45 | 770.12 | 808.62 |
| Carbon Credit | ล้านบาท | | 1.49 | 1.61 | 1.73 | 1.85 | 1.97 | 2.09 | 2.21 | 2.33 | 2.45 | 2.57 | 2.69 | 2.81 | 2.93 | 3.05 | 3.17 | 3.29 | 3.41 | 3.53 | 3.65 | 3.78 |
| **ต้นทุน** | ล้านบาท | | **255.38** | **280.88** | **308.95** | **339.86** | **373.90** | **411.40** | **452.69** | **498.18** | **548.28** | **603.47** | **664.26** | **731.23** | **805.01** | **886.30** | **975.85** | **1074.52** | **1183.24** | **1303.03** | **1435.02** | **1580.46** |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ศุภฤกษ์ อร่ามกิจโพธา

การศึกษา

2007 Master of Science in Project Management, The George Washington University, Washington D.C.

2003 Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok

การทำงาน

2009 ผู้จัดการเขตการขาย ส่วนขายผลิตภัณฑ์พิเศษ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

2008 Process System Design Engineer, Mediatech, Inc., Manassas, Virginia, USA

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University