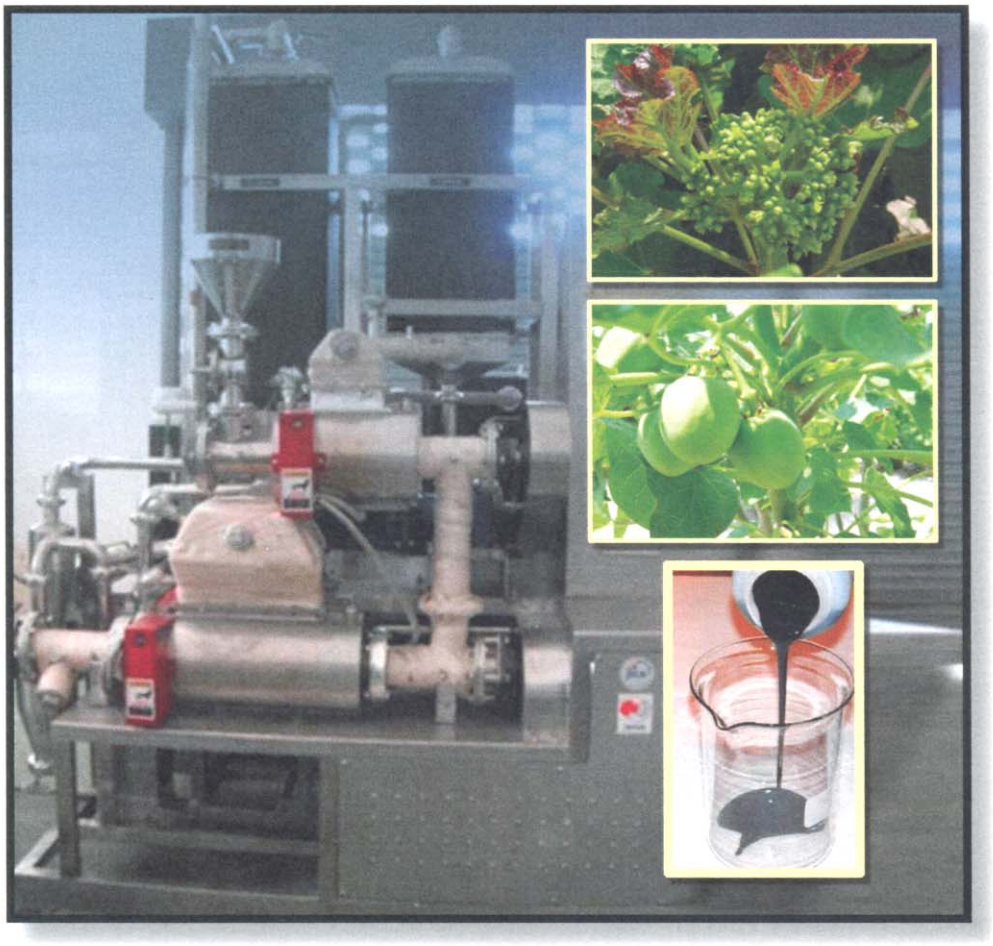
วว.TISTR

โครงการวิจัยที่ ภ.56-11/ย.1/รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลด้วยเทคโนโลยี Fast pyrolysis



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ.56-11
การพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลของเหลือทิ้ง
และขยะพลาสติกแบบครบวงจร

โครงการย่อยที่ 1
กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล
ด้วยเทคโนโลยี Fast pyrolysis

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)
กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล
ด้วยเทคโนโลยี Fast pyrolysis

โดย

วีรชัย สุนทรรังสรรค์

ธเนศ อุทิศธรรม **โสภณ พรหมสุวรรณ**

ยุทธนา ฐานมงคล **กมลรัตน์ หลีเห้ง**

มะนู บุญแสร์ **หิรัญ จินดา**

บรรณาธิการ วว., ปทุมธานี 2559

ศิระ ศิลานนท์ สงวนลิขสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

ศิริสุข ศรีสุข

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

(นางลักษมี ปลั่งแสงมาศ)
ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ เจ้าหน้าที่เทคนิคของฝ่ายเทคโนโลยีพลังงานที่ได้ช่วยให้การดำเนินงานลุล่วงด้วยดี และเจ้าหน้าที่ห้องสมุดของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้อำนวยความสะดวกต่อการสืบค้นข้อมูลการวิจัยอย่างดียิ่ง.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. เทคโนโลยี กระบวนการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	17
4. ผลการวิจัยและวิจารณ์	20
5. สรุปผลการวิจัย	33
6. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	34
7. ข้อเสนอแนะ	36
8. เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	39

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติและองค์ประกอบของกากสบู่ดำ	9
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไม้	13
ตารางที่ 2.3	ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่สภาพแห้ง	13
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันชีวภาพจากไม้และน้ำมันเตา	14
ตารางที่ 2.5	การเปรียบเทียบผลผลิตหลักน้ำมันชีวภาพที่ได้ด้วยเทคโนโลยีไพโรไลซิสแบบเร็วต่างๆ	15
ตารางที่ 2.6	เปรียบเทียบผลผลิตหลักน้ำมันชีวภาพที่ได้ด้วยไพโรไลซิสแบบเร็วจากวัตถุดิบต่างๆ	16
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบแบบประมาณของกากสบู่ดำ	20
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากสบู่ดำ	21
ตารางที่ 4.3	ระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในช่วงการอบแห้ง	21
ตารางที่ 4.4	ระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในช่วงไพโรไลซิส	22
ตารางที่ 4.5	สารระเหยที่คงเหลือในช่วงการอบแห้ง	23
ตารางที่ 4.6	ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้	28
ตารางที่ 4.7	องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้แบบแยกธาตุ	29
ตารางที่ 4.8	ค่าความร้อนน้ำมันชีวภาพและถ่านที่ได้	30
ตารางที่ 4.9	องค์ประกอบของถ่านที่ได้แบบประมาณ	30
ตารางที่ 4.10	องค์ประกอบของถ่านที่ได้แบบแยกธาตุ	31
ตารางที่ 4.11	องค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากสบู่ดำ	31
ตารางที่ 6.1	กลุ่มเป้าหมาย หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์ ผลลัพธ์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น	35

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ต้นสบู่ดำ	6
รูปที่ 2.2	ดอกและผลของต้นสบู่ดำ	7
รูปที่ 2.3	เมล็ดสบู่ดำ	7
รูปที่ 2.4	น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดสบู่ดำ	8
รูปที่ 2.5	กากสบู่ดำที่ผ่านการสกัดน้ำมันด้วยวิธีการทางกายภาพ	9
รูปที่ 2.6	แผนภูมิแสดงกลไกของกระบวนการไพโรไลซีส	11
รูปที่ 2.7	น้ำมันชีวภาพ	12
รูปที่ 3.1	กากสบู่ดำก่อนบด (ซ้าย) และกากสบู่ดำหลังบด (ขวา)	17
รูปที่ 3.2	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน	18
รูปที่ 3.3	รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน	18
รูปที่ 4.1	ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ในช่วงการอบแห้ง	24
รูปที่ 4.2	กากสบู่ดำตั้งต้นและกากสบู่ดำในช่วงการอบแห้ง	24
รูปที่ 4.3	ผลิตภัณฑ์ของเหลว, ถ่านชาร์ และแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ในสภาวะต่างๆ	25
รูปที่ 4.4	ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกากสบู่ดำที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที ในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงไพโรไลซิส	25
รูปที่ 4.5	ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกากสบู่ดำที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที ในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงไพโรไลซิส	26
รูปที่ 4.6	น้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงการอบแห้ง และความเร็วรอบต่างๆ ช่วงไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส	27
รูปที่ 4.7	น้ำมันชีวภาพที่ความเร็วรอบของช่วงการอบแห้ง 550 รอบต่อนาที และอุณหภูมิช่วงไพโรไลซิสที่ 650 องศาเซลเซียส	27

PRODUCING SYNTHETIC FUEL FROM BIOMASS ON FAST PYROLYSIS TECHNOLOGY

Wirachai Soontornrangson, Thanes Utistham, Sopon Promhsuwan, Yoothana Thanmongkon, Kamonrat Leeheng, Manoo Boonsae and Hirun Jinda

ABSTRACT

The present study focuses on the production of biodiesel from Jatropha oil and production of bio-oil from Jatropha cake, i.e. residue left from Jatropha oil extraction. Jatropha biodiesel produced by a 1,000 lit/day pilot scale plant via two-step continuous process known as transesterification, which transformed Triglyceride in Jatropha oil into methyl ester of fatty acids those shared numerous properties and could be blended with fossil diesel as fuel mix for automobile. A pilot plant provided 80 wt% yield of biodiesel with most qualities met the World Wide Fuel Charter (WWFC) Standard. The oxidation stability of Jatropha biodiesel, however, failed to meet the WWFC standard. Thus, the upgrading to improve the oxidation stability of Jatropha biodiesel for meeting the WWFC standard was recommended.

Bio-oil production from Jatropha cake via fast pyrolysis process was conducted by both a two-stage screw pyrolyzer. A two-stage screw pyrolyzer provided maximum yield of 19.54 wt% bio-oil when the drying screw was heated at 450°C and rotated at 550 rpm, and the pyrolysis screw was heated at 650°C and rotated at 800 rpm. The average LHV of bio-oil produced from screw pyrolyzer was ~ 25 MJ/kg. At the highest LHV of bio-oil production was heated at 350°C and rotated at 550 rpm, and the pyrolysis screw was heated at 650°C and rotated at 1000 rpm. In the future, the bio-oil production via two-step continuous process has to developed quality and optimized process for applying to the industrial.

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล ด้วยเทคโนโลยี Fast pyrolysis

วีรชัย สุนทรรังสรรค์[1], ธเนศ อุทิศธรรม[1], โสภณ พรหมสุวรรณ[1], ยุทธนา ฐานมงคล[1], กมลรัตน์ หลีเห้ง[1], มะนู บุญแสร์[1] และหิรัญ จินดา[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดจากเมล็ดสบู่ดำ และการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) จากกากสบู่ดำที่เหลือจากกระบวนการสกัดน้ำมัน การผลิตไบโอดีเซลอาศัยกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) แบบต่อเนื่องสองขั้นตอนเพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันสบู่ดำให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียง และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากน้ำมันดิบ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลใช้เครื่องต้นแบบระดับโรงงานนำทางขนาด 1,000 ลิตร/วัน ให้ปริมาณผลได้ของน้ำมันไบโอดีเซลมากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้น ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ผลิตได้มีคุณภาพส่วนใหญ่เป็นไปตามข้อกำหนดคุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากล (World Wide Fuel Charter, WWFC) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ร่วมกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากน้ำมันดิบได้ อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ มีค่าความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำกว่าค่ามาตรฐาน อันเนื่องมาจากปริมาณโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ หากต้องการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลในเชิงพาณิชย์ ควรจะต้องนำไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อเพิ่มค่าความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน.

การผลิตน้ำมันชีวภาพใช้กระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) โดยใช้ปฏิกรณ์แบบสกรูสองขั้นตอน (Two-stage screw pyrolyzer) การผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูสองขั้นตอนให้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 19.54 ของน้ำหนักกากสบู่ดำที่ป้อน เมื่อสกรูสำหรับช่วงการอบแห้งมีอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที และสกรูสำหรับช่วงไพโรไลซีสมีอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที น้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าความร้อนเฉลี่ย ~ 25 เมกกะจูล/กิโลกรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที ในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาทีในช่วงการไพโรไลซิส.

---

[1]ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

1. บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้นในปัจจุบันนี้ ได้ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนที่รุนแรงขึ้นเรื่อยๆ อันเนื่องจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก นอกจากนี้แล้ว ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงในตลาดโลกที่ยังมีความผันผวนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทุกประเทศทั่วโลกได้ตื่นตัวในการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนประเภทน้ำมันเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ชีวมวล (Biomass) เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้อย่างดี แต่ชีวมวลที่มีศักยภาพทั้งด้านปริมาณและคุณภาพต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลังงานทดแทนนั้น ส่วนใหญ่แล้วมาจากแหล่งอาหาร สำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์หรือสัตว์ เช่น อ้อย, มันสำปะหลัง และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น. การนำชีวมวลที่เป็นแหล่งอาหารมาผลิตเป็นพลังงานนั้น จึงเกิดความขัดแย้งทางความคิดอย่างมากในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมา โดยเฉพาะแล้ว ประเทศที่กำลังพัฒนายังมีความขาดแคลนเรื่องอาหาร แต่เพื่อความมั่นคั่งทางเศรษฐกิจและพลังงานแล้ว ความต้องการพลังงานสำหรับขับเคลื่อนธุรกิจ/อุตสาหกรรม ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน เช่น รถยนต์ และเครื่องปรับอากาศ ฯลฯ จึงถือว่าพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ต้องจัดหามาให้เพียงพอ ดังนั้น การนำชีวมวลบางชนิดซึ่งเป็นแหล่งพืชด้านอาหารไปใช้เป็นแหล่งพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการผลิตน้ำมันสำหรับใช้กับยานพาหนะประเภทต่างๆด้วยเหตุนี้ ทำให้มีความพยายามที่จะหาวิธีการต่างๆ เพื่อลดปัญหาและข้อขัดแย้งดังกล่าว ซึ่งแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้และได้รับความสนใจระดับนานาชาติ คือ การวิจัยพัฒนาเชื้อเพลิงทดแทนจากชีวมวลที่ไม่ใช่อาหาร เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร สบู่ดำ มะเยาหิน สาหร่าย และหญ้าเนเปียร์ เป็นต้น.

การผลิตน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil) ประเภทน้ำมันดีเซล, น้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันเตาจากแหล่งวัตถุดิบที่เป็นชีวมวลสามารถทำได้จากหลากหลายเทคโนโลยี เช่น โดยผ่านทางเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification technology) ผ่านทางเทคโนโลยีไพโรไลซีส (Pyrolysis technology) เป็นต้น. ปัจจุบันเทคโนโลยีไพโรไลซีสได้มีการวิจัยและพัฒนาจนมีความเป็นไปได้ต่อการลงทุนเชิงธุรกิจสูง เทคโนโลยีนี้แบ่งออกได้หลายแบบ (3-6) เช่น Fluidized bed pyrolysis, Vacuum pyrolysis เป็นต้น ในแต่ละแบบมีข้อดีและข้อด้อยต่างๆกัน เช่น แบบ Fast pyrolysis ต้องทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส ในเวลาที่สั้น แต่แบบ Hydrothermal pyrolysis ไม่มีความ

จำเป็นดังกล่าว เป็นต้น. สำหรับวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำและมีขนาดเล็ก เช่น ขี้เลื่อย เศษวัสดุทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เป็นต้นเทคโนโลยี Fast pyrolysis เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความเหมาะสมมากที่สุด อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ต้องออกแบบให้การทำปฏิกิริยาในช่วงเวลาที่ต่ำกว่า 1 นาที ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งที่ทำให้เทคโนโลยีนี้ยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร.

Fast pyrolysis เป็นกระบวนการที่สารอินทรีย์ถูกทำให้อุณหภูมิสูงประมาณ 500 องศาเซลเซียส ในเวลาน้อยกว่า 1 นาที ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โครงสร้างทางเคมีของแข็งถูกย่อยสลายและถูกทำให้เป็นของเหลวในเวลาที่สั้นเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (bio oil) และได้ของแข็งและแก๊สเป็นผลพลอยได้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนสูงแต่ยังมีสัดส่วนออกซิเจนสูงเช่นกัน มีคุณสมบัติเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้และสามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาที่มีการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นน้ำมันดีเซล/เบนซินสังเคราะห์.

นอกจากแนวโน้มการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จะมีความเป็นไปได้สูงในปัจจุบันและอนาคตแล้ว เทคโนโลยี Fast pyrolysis ยังมีเหตุผลสนับสนุนอื่นๆ อีก ดังนี้

- เป็นเทคโนโลยีที่ไม่สูงเกินไป ทำให้มีโอกาสที่จะวิจัยและพัฒนาขึ้นเองภายในประเทศได้และต้องการเงินลงทุนไม่สูง.
- ราคาเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถแข่งขันในตลาดได้ เนื่องจากมีเป้าหมายในการนำไปทดแทนการใช้น้ำมันเตาสำหรับการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม หรือการใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมในน้ำมันดีเซล/เบนซิน ซึ่งเป็นที่ทราบแล้วว่า น้ำมันเตา หรือน้ำมันดีเซล/เบนซินเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและภาคขนส่งที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีแนวโน้มว่าราคาจะปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง.
- ผู้ใช้มีจำนวนมากและหลากหลายในภาคอุตสาหกรรมและขนส่ง กระจายตัวอยู่ทั่วประเทศทำให้ง่ายต่อการจัดการและลดค่าขนส่ง.
- ระบบทำงานที่สภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิไม่สูง ทำให้ควบคุมระบบได้ง่าย.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้เล็งเห็นถึงความจำเป็นและโอกาสที่จะพัฒนาขีดความสามารถของนักวิจัย วว. ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตน้ำมันชีวภาพสำหรับใช้ในภาคการคมนาคม/ขนส่งจากชีวมวลที่ไม่ใช่อาหาร วว. จึงได้จัดทำโครงการเพื่อการศึกษา วิจัยและพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนจากสบู่ดำ ซึ่งนับว่าเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งที่ไม่ใช่อาหาร โดยในการศึกษานี้ จะเน้นที่การใช้ประโยชน์จากกากสบู่ดำ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจาก

กระบวนการบีบสกัดน้ำมันสบู่ดำออกไปแล้ว โดยปกติส่วนของน้ำมันมักจะนำไปใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซล สำหรับกากสบู่ดำนั้นจะถูกใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยเทคโนโลยีไพโรไลซีสแบบเร็ว (Fast pyrolysis).

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำด้วยเทคโนโลยีไพโลไรซีสแบบเร็ว.

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

- จัดหาและปรับสภาพทางกายภาพของกากสบู่ดำให้เหมาะกับการนำมาใช้งาน.
- วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของกากสบู่ดำ.
- ดำเนินงานศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบชนิดสกรู.
- ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันชีวภาพทีผลิตได้.
- ปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มปริมาณ และคุณภาพของ น้ำมันชีวภาพ.

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- พัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ.
- ผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำด้วยเทคโนโลยีไพโลไรซิสแบบเร็วขนาดป้อนวัตถุดิบ 3 กิโลกรัม/ชั่วโมง.

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สิทธิบัตรเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็ว เพื่อใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ.
- กระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำ.
- บทความที่จะเผยแพร่ทั้งในและนอกประเทศ.
- การสัมมนาทางวิชาการภายในประเทศ.
- เทคโนโลยีที่นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์.

2. เทคโนโลยี กระบวนการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สบู่ดำ

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสบู่ดำ

สบู่ดำ (Physic nut หรือ Jatropha) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha Curcas* Linn. อยู่ในตระกูล Euphorbiaceae เป็นไม้พุ่มสูงประมาณ 2-7 เมตร มีอายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี ลำต้นเกลี้ยงเกลาและเนื้อไม้ไม่มีแก่น ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีชื่อเรียกแตกต่างในแต่ละท้องถิ่น เช่น ภาคเหนือเรียกมะหุ่งฮั้ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกมะเยาหรือสีหลอดภาคใต้เรียกหุ่งเทศ.

รูปที่ 2.1 ต้นสบู่ดำ.

ดอกสบู่ดำเป็นช่อกระจุกที่ข้อส่วนปลายยอดผลสบู่ดำมีประมาณ 3 เมล็ด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ขณะยังอ่อนผลจะมีสีเขียวอ่อนและมีสีเหลืองเมื่อแก่จัดตั้งแต่ดอกจนกลายเป็นผลแก่ใช้เวลาประมาณ 60-90 วันเมล็ดสบู่ดำมีสีดำขนาดยาวประมาณ 1-2 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมล็ดสบู่ดำมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 35 ของน้ำหนักเมล็ด เมล็ดสบู่ดำจำนวน 4 กิโลกรัม นำมาสกัดน้ำมันได้ 1 ลิตร และที่เหลือเป็นกาก จำนวน 3 กิโลกรัม น้ำมันสบู่ดำสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลกับเครื่องจักรกลทางการเกษตรได้ ต้นสบู่ดำให้ผลผลิตเมล็ดประมาณ 100-800 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปีโดยปริมาณผลผลิตขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ และการดูแลรักษาที่เหมาะสม (เจริญรัถ 2548).

รูปที่ 2.2 ดอกและผลของต้นสบู่ดำ.

รูปที่ 2.3 เมล็ดสบู่ดำ.

โดยทั่วไปมีการนำเมล็ดสบู่ดำมาบีบเพื่อนำน้ำมันไปใช้ประโยชน์เท่านั้น สบู่ดำจึงไม่ใช่เป็นพืชอาหารสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้โดยไม่มีข้อโต้แย้งปัจจุบัน สบู่ดำได้ถูกจัดอยู่ในพืชพลังงานที่ได้รับการส่งเสริมสนับสนุนตามแผนปฏิบัติการ (พ.ศ. 2555-2559) ระหว่างกระทรวงพลังงานและกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการดำเนินการวิจัยและพัฒนา “เชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซลในอนาคต” โดยมีเป้าหมายจะใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกให้ได้ร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานของประเทศในปี พศ. 2564 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2558).

เมล็ดสบู่ดำสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ 2 แนวทาง คือนำเมล็ดสบู่ดำไปสกัดเอาน้ำมันไปผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน และการนำกากสบู่ดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันไปเผาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง หรือแปรรูปเป็นแก๊สหรือน้ำมันเชื้อเพลิง.

2.1.2 การสกัดน้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันสบู่ดำที่สกัดได้มีลักษณะใส แข็งตัวที่อุณหภูมิ -7 องศาเซลเซียส จึงไม่จับตัวเป็นไขที่อุณหภูมิห้อง และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสีได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4.

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

รูปที่ 2.4 น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดสบู่ดำ.

ในการสกัดน้ำมันสบู่ดำออกจากเมล็ดสบู่ดำนั้น มีวิธีการสกัดน้ำมันสบู่ดำเพื่อให้ได้ปริมาณและคุณภาพที่นิยมมี 3 วิธี ดังนี้

- การสกัดในห้องปฏิบัติการโดยการบดให้ละเอียดแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลี่ยมอีเทอร์ (Soxhlet extraction) จะได้น้ำมันประมาณร้อยละ 35-55.
- การสกัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอริกจะได้น้ำมันประมาณร้อยละ 25-30 และมีน้ำมันตกค้างในกากร้อยละ 10-15.
- การสกัดด้วยเครื่องอัดแบบสกรู จะได้น้ำมันประมาณร้อยละ 25-30 มีน้ำมันตกค้างในกากร้อยละ10-15.

2.1.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของกากสบู่ดำ

ภายหลังจากการสกัดน้ำมันสบู่ดำแล้ว ส่วนที่เหลือเป็นกากสบู่ดำยังคงมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 กากสบู่ดำนี้มีค่าไนโตรเจนสูง เหมาะที่จะนำไปเป็นส่วนผสมในปุ๋ยและอาหารสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติและองค์ประกอบของกากสบู่ดำ.

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

รูปที่ 2.5 กากสบู่ดำที่ผ่านการสกัดน้ำมันด้วยวิธีการทางกายภาพ.

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบของกากสบู่ดำ

คุณสมบัติ/องค์ประกอบ	ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง		
	เปลือกหุ้มผล	เปลือกหุ้มเมล็ด	เมล็ด
การละลายในแอลกอฮอล์ และเบนซิน	8.8	27.7	60.4
Lignin	13.5	13.9	1.4
Holo - cellulose or Total cellulose	42.0	32.5	14.6
Cellulose or Alpha (∂) cellulose	26.6	23.6	8.3
Hemi - cellulose	15.4	8.9	6.3
Beta - cellulose	4.5	2.7	1.0
Gamma - cellulose	10.9	6.2	5.3

หมายเหตุ: Holo – cellulose = Cellulose + Hemi – cellulose

Hemi – cellulose = Beta – cellulose + Gamma – cellulose

ที่มา: กรมวิทยาศาสตร์บริการ (2559)

2.1.4 การใช้กากสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิง

กากสบู่ดำนิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ 3 วิธี คือ

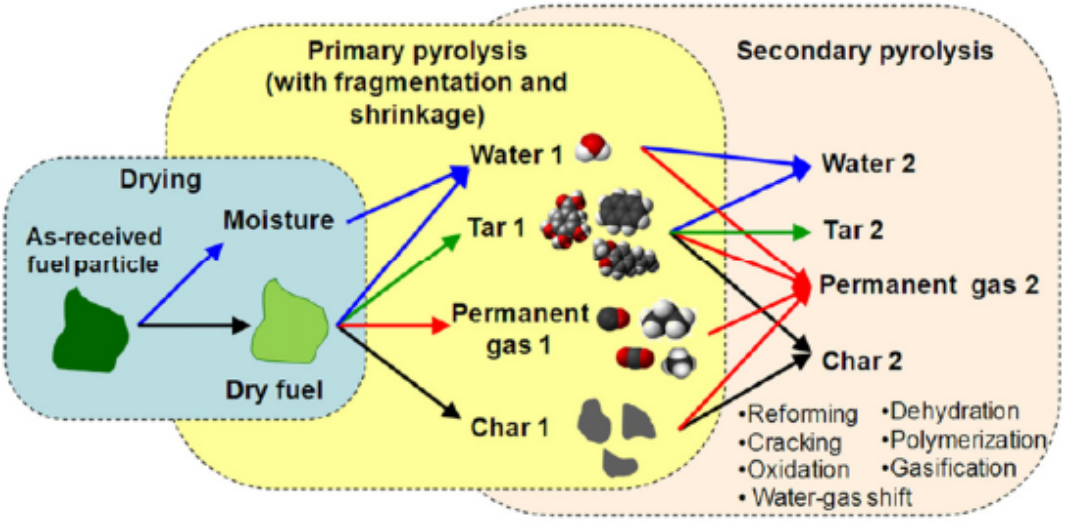
- เผาไหม้โดยตรง (direct combustion) เป็นการนำกากสบู่ดำไปเผาโดยตรงเหมือนกับการเผาไหม้วัสดุอื่นๆ เนื่องจากกากสบู่ดำมีค่าความร้อนสูงประมาณ 4,500 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าความร้อนมากกว่าถ่านหินลิกไนต์เกือบ 2 เท่า และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนถ่านหินบิทูมินัส ทั้งนี้ กากสบู่ดำไม่มีซัลเฟอร์ ดังนั้น ไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของกากสบู่ดำจึงไม่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.
- แปรรูปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เพื่อกลั่นสลายกากสบู่ดำให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthetic gas or syngas) แล้วจึงนำ syngas ไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการเผากากสบู่ดำแบบการเผาไหม้โดยตรง.
- แปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง โดยผ่านการทำเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ก่อนแล้วจึงแปรรูปเป็นน้ำมันสังเคราะห์ เช่น ดีเซลสังเคราะห์ แก๊สโซลีนสังเคราะห์เป็นต้นหรือโดยการแปรรูปเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)แล้วจึงแปรรูปเป็นน้ำมันเพลิงสังเคราะห์.

2.2 เทคโนโลยี และ/หรือกระบวนการที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กระบวนการไพโรไลซีส

ทั่วไปแล้ว ไพโรไลซีส (pyrolysis) เป็นกระบวนการกลั่นสลายสารที่มีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 3 ชนิด คือ ก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนต่างๆ), ของเหลวจำพวกสารละลายอินทรีย์และน้ำมันดิน (tar) และของแข็งจำพวกถ่าน (char).

จากรูปที่ 2.6 แสดงกลไกของกระบวนการไพโรไลซีสที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีหลายขั้นตอน ให้ผลผลิตหลากหลายชนิด การไพโรไลซีสสามารถแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการหลักๆ ดังนี้ กระบวนการอบแห้ง (drying), กระบวนการไพโรไลซีสปฐมภูมิ (Primary Pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซีสทุติยภูมิ (Secondary pyrolysis).



ที่มา: (Jones 2016)

รูปที่ 2.6 แผนภูมิแสดงกลไกของกระบวนการไพโรไลซีส.

นอกจากนี้แล้ว กระบวนการไพโรไลซีส ยังสามารถแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็น 3 แบบ คือ

- ไพโรไลซิสแบบช้า (pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในอัตราไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส/วินาที ใช้เวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการมากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ได้ผลผลิตหลักเป็นถ่าน และได้ผลผลิตรองเป็นก๊าซและน้ำมันดิน.
- ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในอัตรา 10-100 องศาเซลเซียส/วินาที ใช้เวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการน้อยกว่า 5 วินาที ได้ผลผลิตหลักเป็นน้ำมันชีวภาพ ประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และได้ผลผลิตรองเป็นก๊าซและถ่าน.
- ไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว (Flash pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในอัตราสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส/วินาที ใช้เวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการน้อยกว่า 1 วินาที ได้ผลผลิตหลักเป็นน้ำมันชีวภาพ มากกว่าร้อยละ 70 และได้ผลผลิตรองเป็นก๊าซและถ่าน.

2.2.2 การนำน้ำมันชีวภาพไปใช้ประโยชน์

น้ำมันชีวภาพมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่ทั้งนี้ สีของน้ำมันชีวภาพยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการให้ความร้อนมีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น Pyrolysis oil, bio crude-oil, bio-fuel-oil, liquid smoke, pyrolysis tar, pyroligneous acid เป็นต้น (Boateng, Jung and Alder 2006).

รูปที่ 2.7 น้ำมันชีวภาพ.

น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมที่สามารถละลายน้ำได้ มีน้ำปนเปื้อนค่อนข้างสูงร้อยละ 15-30 มีความถ่วงจำเพาะ 1.2 จึงหนักกว่าน้ำ มีสภาพเป็นกรด ที่ค่า 2.5 มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนประมาณร้อยละ 59.5-65.0 แต่มีออกซิเจนประมาณร้อยละ 35-40 ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิด มีเถ้าเพียงร้อยละ 0.02 และมีค่าความร้อน 16-19 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยรวมแล้ว สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในหม้อไอน้ำโดยตรงได้ แต่เนื่องจากมีความเป็นกรดจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ของหม้อไอน้ำได้.

โดยที่น้ำมันชีวภาพเป็นสารเคมีที่ไม่เสถียรอันเป็นผลมาจากเวลา การสัมผัสกับอากาศ (ออกซิเจน) และอุณหภูมิ ความมีขั้วและไม่มีขั้วขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำมันชีวภาพเกิดการแยกชั้นได้เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน หากปล่อยให้น้ำมันชีวภาพสัมผัสอากาศก็จะเกิดการเปลี่ยนสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ระยะเวลาในการเก็บรักษาสั้นลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ความไม่เสถียรจะเพิ่มขึ้นหากน้ำมันชีวภาพนั้นๆ อยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น เมื่อน้ำมันชีวภาพมีอุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาพอลิมอไรเซชัน (polymerization) กันเองทำให้โมเลกุลใหญ่ขึ้น ส่งผลให้มีค่าความหนืดสูงขึ้นและค่าความร้อนลดลง และมีระยะเวลาในการเก็บรักษาสั้นลงด้วย ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงจำเป็นต้องกักเก็บที่อุณหภูมิต่ำเพื่อรักษาคุณสมบัติทางกายภาพให้คงเดิม.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไม้

คุณสมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ
น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15-30
ค่ากรด-เบส	2.5
ความถ่วงจำเพาะ	1.2
คาร์บอน	54-58
ไฮไดรเจน	5.5-7.0
ออกซิเจน	35-40
ไนโตรเจน	0.02
เถ้า	0.02
ค่าความร้อน (เมกกะจูล/กิโลกรัม)	16-19
ค่าความหนืด (ที่ 50 องศาเซลเซียส) (เซนติสโตก)	40-100
ของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2-1
กากของแข็งจากการกลั่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สูงกว่า 50

ที่มา: Boateng, Jung and Alder (2006)

น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายได้ในน้ำ, เมทานอลและเอทานอล แต่ไม่ละลายในน้ำมันไฮโดรคาร์บอน และสามารถใช้ในการเผาไหม้ได้เช่นเดียวกับน้ำมันปิโตรเลียม เปรียบเทียบค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพกับน้ำมันอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่ค่อนข้างต่ำจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพอีก เนื่องมาจากกากสบู่ดำยังคงมีออกซิเจนปนอยู่สูงประมาณร้อยละ 35-40 ตามที่ดังแสดงในตารางที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำจึงต้องมีการนำออกซิเจนออกจากวัตถุดิบทั้งก่อน, ระหว่างกระบวนการ หรือภายหลังจากผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพแล้ว.

ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่สภาพแห้ง

ชนิดของเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)
Crude oil	42.68
Bio diesel	33.50
Ethanol	29.70
2-Propanol	33.60
1-Butanol	33.10
*Bio-oil	17.50

หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำ

ที่มา: Bridgwater, Anthony and alejandro (2012)

โดยทั่วไปแล้ว การนำน้ำมันชีวภาพไปใช้ประโยชน์นั้นนิยมนำไปใช้ 2 แนวทาง คือ นำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรง และนำไปพัฒนาต่อโดยการนำออกซิเจนออกจากน้ำมันชีวภาพ จากนั้น จึงนำไปกลั่นแยกเป็นน้ำมันชนิดต่างๆ เช่น เบนซิน และดีเซล เป็นต้น แต่ขั้นตอนการนำไปพัฒนาต่อนั้นต้องใช้การลงทุนและเทคโนโลยีที่ซับซ้อนกว่า ดังนั้น จึงนิยมนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ได้แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวล (ไม้) กับน้ำมันเตา.

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันชีวภาพจากไม้และน้ำมันเตา

คุณสมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเตา
pH	2.5	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.9
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	16 – 19	40
ความหนืด (cP) ที่ 40 องศาเซลเซียส	30 – 200	180
จุดไหลเท	-30	-18

ที่มา: แหวนเพ็ชร (2552)

2.3 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันชีวภาพ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ที่การกลั่นสลายสารอินทรีย์ทางเคมีความร้อนในที่จำกัดปริมาณออกซิเจนที่ช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส โดยที่ปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซีสนี้ให้ผลผลิตหลักเป็นน้ำมันชีวภาพจากการศึกษาโดยผู้เชียวชาญได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบตามเงื่อนไข/สภาวะแวดล้อมและผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของบริษัท/สถาบันที่มีการวิจัยในเทคโนโลยีนี้ที่โดดเด่น ดังที่แสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งผลผลิตหลักที่ได้เป็นน้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 55-70.

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบผลผลิตหลักน้ำมันชีวภาพที่ได้ด้วยเทคโนโลยีไพโรไลซิสแบบเร็วต่างๆ

เทคโนโลยี	**GIT**	**Ensyn**	**laval**	**SERI**	**Twente**
อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส	500	550	480	510	600
ความดัน, บาร์	1.0	1.0	0.01	1.0	1.0
อัตราป้อน, กิโลกรัม/ชั่วโมง	50	50	30	30	12
dp (mm)	0.5	0.2	10	5	0.5
อุณหภูมิก๊าซ, °ซ	1.0	0.4	3	1	0.5
อุณหภูมิถ่าน, °ซ	1.0	0.4	100	n.a.	0.5
ปริมาณก๊าซ, %โดยน้ำหนัก	30	25	14	35	20
ปริมาณน้ำมัน, %โดยน้ำหนัก	60	65	65	55	70
ปริมาณถ่าน, %โดยน้ำหนัก	10	10	21	10	10
คุณสมบัติของน้ำมัน (ที่สภาพนำส่ง)					
ความหนาแน่น	1.23	1.21	1.23	1.20	1.20
ความหนืด, cP	10 (60c)	90 (25c)	5 (40c)	90 (30c)	80 (20c)
คาร์บอน, %โดยน้ำหนัก	39.5	45.5	49.9	54.4	43.2
ไฮโดรเจน, %โดยน้ำหนัก	7.5	7.0	7.0	5.7	8.2
ออกซิเจน, %โดยน้ำหนัก	52.6	45.4	43.0	39.8	48.6
ค่าความร้อน, เมกกะจูล/กิโลกรัม	24	19.3	21	15	25
น้ำในน้ำมัน, %โดยน้ำหนัก	29	16	18	15	25
ผลิตภัณฑ์ที่ได้					
น้ำมัน, %โดยน้ำหนัก	21	-	59	66	70
น้ำ, %โดยน้ำหนัก	26	-	26	10	10
ถ่าน, %โดยน้ำหนัก	21	-	15	14	10
ก๊าซ, %โดยน้ำหนัก	32	-	-	10	10

แต่งานวิจัยอิสระทั่วไปด้านการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งแบ่งกลุ่มออกเป็นตามชนิดของวัตถุดิบ โดยที่ใช้อุณหภูมิช่วงไพโรไลซีส 300-700 องศาเซลเซียส โดยอย่างยิ่งแล้ว การไพโรไลซีสกากสบู่ดำให้ผลผลิตหลักน้ำมันชีวภาพค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบประเภทอื่นๆ.

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบผลผลิตหลักน้ำมันชีวภาพที่ได้ด้วยไพโรไลซิสแบบเร็วจากวัตถุดิบต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชนิด	ผลผลิต (ร้อยละ)	หมายเหตุ
500	กะลาปาล์ม	46.4	ฤกษ์หิรัญโชติ และคณะ (2550)
-	กากสบู่ดำ	48.0	Boateng *et al.* (2006)
500	กากสบู่ดำ	64.2	Bridgwater *et al.* (2012)
300-800	กากสบู่ดำ	>50.0	Faisal Abnisa *et al.* (2011)
550	ก้านฝ้าย	55.0	Sung Won Kim *et al.* (2013)
400-700	ก้านฝ้าย	23.8	Antony Raja *et al.* (2010)
480-530	ก้านฝ้าย	55.0	Jourabchi *et al.* (2014)
450-550	แกลบ	46.4	Zheng *et al.* (2008)
200-500	ขี้เลื่อย	55.0	Jourabchi *et al.* (2014)
300-600	ชานอ้อย	66.0	Pütün *et al.* (2005)
600	ชีวมวล	54.0	Park *et al.* (2008)
-	ซังข้าวโพด	60.0	Karaosmanogle *et al.* (1999)
442	ทะลายปาล์ม	46.0	Asadullah *et al.* (2007)
480	เปลือกถั่ว	50.0	Onay *et al.* (2007)
400- 700	เปลือกมันฝรั่ง	18.6-27.1	Mullen *et al.* (2010)
450	ผักตบชวา	38.2	Grieson *et al.* (2009)
480	ฟางข้าว	53.8	Manurung *et al.* (2009)
400	หญ้าคา	39.3	Zheng *et al.* (2008)

3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของโครงการนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ วัสดุ, อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองเครื่องมือการทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 กากสบู่ดำ

รูปที่ 3.1 กากสบู่ดำก่อนบด (ซ้าย) และกากสบู่ดำหลังบด (ขวา).

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- เตตระไฮโดรฟูแรน จาก Ajax (Laboratory grade).
- ไดคลอโรมีเทน จาก Merck (AR grade).
- โซเดียมซัลเฟต จากAjax (AR grade).

3.1.3 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมวัตถุดิบ และวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันชีวภาพ

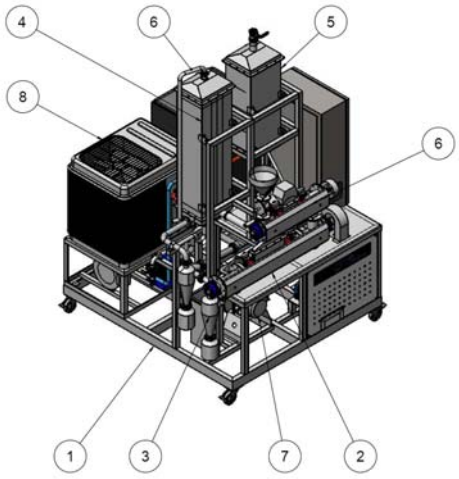
ตามที่ได้แสดงในภาคผนวก

3.2 เครื่องมือการทดลอง

3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน ที่ใช้ในการทดลองเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3.

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน.



รูปที่ 3.3 รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน.

ส่วนประกอบปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน มีรายละเอียดตามรายการดังต่อไปนี้

- หมายเลข 1 คือ ชุดอบแห้ง (Drying set) 1 ชุด
- หมายเลข 2 คือ ชุดไพโรไลซิส (Pyrolysis set) 1 ชุด
- หมายเลข 3 คือ ชุดดักจับฝุ่น (Cyclone) 2 ชุด
- หมายเลข 4 คือ ชุดควบแน่น 1 (Condenser 1) 1 ชุด
- หมายเลข 5 คือ ชุดควบแน่น 2 (Condenser 2) 1 ชุด
- หมายเลข 6 คือ ข้อต่อชุดควบแน่น 1 - 2 (Joint condenser 1 - 2) 1 ชุด
- หมายเลข 7 คือ เครื่องเป่าลม (Blower) 1 ชุด
- หมายเลข 8 คือ เครื่องทำความเย็น (Chiller unit) 1 ชุด
- หมายเลข 9 คือ โครงสร้างและระบบท่อ (Structure support and piping) 1 ชุด

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอนแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.3.1 การเตรียมการทดลอง

- เปิดเครื่องทำความเย็น ให้ได้อุณหภูมิน้ำเย็นที่ 5 องศาเซลเซียส.

3.3.2 การเตรียมชุดอบแห้ง

- เปิดชุดทำความร้อนของชุดอบแห้งให้ได้อุณหภูมิตามที่ทำการทดลองที่ 250, 350, 450 และ 550 องศาเซลเซียส.
- เปิดสกรูในชุดอบแห้ง และตั้งความเร็วรอบตามที่ทำการทดลองที่ 350, 450, 550 และ 650 รอบต่อนาที.
- เมื่ออุณหภูมิของชุดอบแห้งได้ตามที่กำหนดแล้ว นำกากสบู่ดำที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ป้อนเข้าสู่ชุดอบแห้ง และทำการเก็บตัวอย่าง.
- วิเคราะห์สารระเหยของตัวอย่าง และปริมาณของเหลวที่ได้จากชุดอบแห้ง.
- คัดเลือกสภาวะที่เหมาะสม โดยกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อนำมาทำการศึกษาในชุดไพโรไลซิสในขั้นตอนต่อไป.

3.3.3 การผลิตน้ำมันชีวภาพ

- เปิดเครื่องให้ความร้อนในชุดไพโรไลซิส 650 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถดำเนินการได้).
- เปิดสกรูในชุดไพโรไลซิส และตั้งความเร็วรอบตามที่ต้องการศึกษาที่ 800, 1,000, 1,200 และ 1,400 รอบต่อนาที.
- เมื่ออุณหภูมิของชุดอบแห้ง และชุดไพโรไลซิสถึงค่าที่กำหนด ป้อนกากสบู่ดำเข้าสู่ชุดอบแห้งจำนวน 500 กรัม ในแต่ละการทดลอง.
- เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งของเหลว, ของแข็ง (ผงถ่าน) และแก๊สที่ได้จากการทดลอง.

3.3.4 การหยุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน

- ปิดเครื่องให้ความร้อนสกรูทั้งสองชุด.
- เมื่ออุณหภูมิในชุดอบแห้งและชุดไพโรไลซิสต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสปิดระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นเครื่องเป่าลม และสกรูทั้งสองชุด.
- ปิดเมนสวิตช์จ่ายไฟฟ้าของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน.

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน ซึ่งผลจากการทดลองได้ผลผลิตเป็น 4 ชนิด คือ ก๊าซ น้ำมันชีวภาพ ถ่านคาร์บอนและน้ำ ผลผลิตที่ได้นี้มีการศึกษาแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าเพียง 2 ชนิด คือ น้ำมันชีวภาพ และถ่านคาร์บอน เนื่องจากเป็นส่วนที่มีศักยภาพสูงที่สุด ส่วนผลผลิตอีก 2 ชนิด คือ ก๊าซและน้ำ ยังไม่มีการศึกษาในรายละเอียดในการวิจัยนี้เนื่องจากยังมีศักยภาพต่ำและไม่มีเครื่องมือวิเคราะห์.

4.1 คุณสมบัติของกากสบู่ดำ

องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของกากสบู่ดำตามวิธีวิเคราะห์ ASTM D 3172, ASTM D 3177, ASTM D 5373 และ ASTM D 5865 ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่า กากสบู่ดำตามสภาพนำส่งมีค่าความชื้นสูงร้อยละ 12.42 มีค่าสารระเหยและคาร์บอนคงตัวสูงร้อยละ 74.35 และ 7.14 ตามลำดับ. ดังนั้น สารไฮโดรคาร์บอนในกากสบู่ดำตามสภาพนำส่งจึงมีค่าความร้อนสูง16,440 กิโลจูล/กิโลกรัม ใกล้เคียงกับชีวมวล เช่น ไม้ยูคาร์ลิปตัสที่มีค่าความร้อนต่ำสูง 17,920 กิโลจูล/กิโลกรัม ตามสภาพนำส่งที่มีความชื้นร้อยละ 6.94 ในการนำกากสบู่ดำนี้ไปใช้เผาไหม้ที่น้ำหนักเท่ากันที่ 1 กิโลกรัม ที่มีความชื้นร้อยละ 0.00 เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาร์ลิปตัส พบว่า ค่าความร้อนของกากสบู่ดำมีค่าสูงถึง 18,771 กิโลจูล/กิโลกรัม ในขณะที่ไม้ยูคาร์ลิปตัสมีค่าความร้อน 19,256 กิโลจูล/กิโลกรัม ดังนั้นกากสบู่ดำที่ไม่มีความชื้นเลยจะมีค่าความร้อนไม่ต่างจากไม้ยูคาร์ลิปตัสมากนัก สามารถใช้ทดแทนกันได้.

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบแบบประมาณของกากสบู่ดำ

ผลวิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น (moisture)	12.42
เถ้า (ash)	6.09
สารระเหย (volatiles)	74.35
คาร์บอนคงตัว (fix carbon)	7.14
รวมทั้งหมด (Total)	100.00

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากสบู่ดำ

ผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	42.24
ไฮโดรเจน (H)	6.57
ออกซิเจน*(O)	45.16
ไนโตรเจน (N)	5.66
กำมะถัน (S)	0.37
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	16.44

หมายเหตุ: *คำนวณโดยใช้ผลต่าง

4.2 ผลการทดลองผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน

4.2.1 ช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

เนื่องจากเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในช่วงของการอบแห้งและช่วงของการไพโรไลซิสนั้น แปรผันกับความเร็วรอบของสกรู ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดของน้ำมันชีวภาพ ช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในสกรูตามความเร็วรอบของสกรูในช่วงการอบแห้งและช่วงการไพโรไลซิส ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ.

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในช่วงการอบแห้ง

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)
350	4.50
400	4.00
450	3.50
500	3.00
550	2.50
600	2.00
650	1.50

ตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากสบู่ดำ ประกอบด้วย 3 ตัวแปรหลัก คือ ผลของอุณหภูมิในช่วงการอบแห้ง (T1), ผลของความเร็วรอบในช่วงการอบแห้ง (R1) และผลของความเร็วรอบในช่วงการไพโรไลซิส (R2) เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในช่วง

การไพโรไลซิส (T2) ที่ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสกรูในช่วงการไพโรไลซิส ที่สามารถรองรับอุณหภูมิสูงสุดได้ที่ค่าดังกล่าว.

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในช่วงไพโรไลซิส

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	เวลา (วินาที)
800	7.00
900	7.00
1,000	6.00
1,100	6.00
1,200	5.00
1,300	5.00
1,400	4.00
1,500	4.00

4.2.2 ผลผลิตที่ได้ในช่วงการอบแห้ง

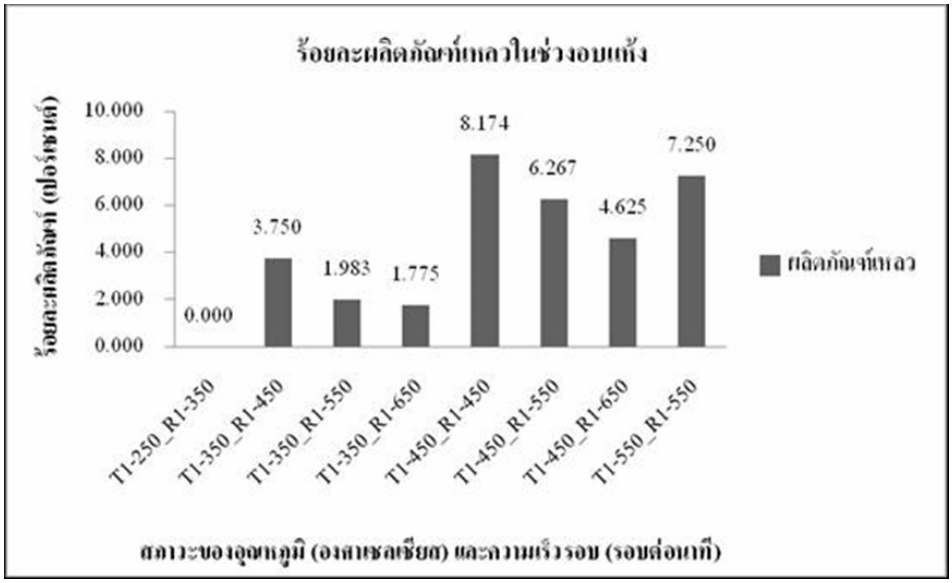
เนื่องจากอุณหภูมิตั้งแต่ 280 องศาเซลเซียส ทำให้สารระเหยในกากสบู่ดำเริ่มสลายตัว ดังนั้นก่อนที่กากสบู่ดำจะผ่านเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสนั้น จึงควรที่จะต้องมีการให้ความร้อนสกรูในช่วงการอบแห้งเพื่อลดความชื้นและสารระเหยในกากสบู่ดำออกไปก่อนบ้างซึ่งได้เลือกให้อุณหภูมิ (T1) ที่ 250, 350, 450 และ 550 องศาเซลเซียส. อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่ให้กับสกรูในช่วงการอบแห้งนี้ไม่ได้มีอุณหภูมิตามที่กำหนด เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาที่กากสบู่ดำอยู่ในสกรูด้วย (รอบการหมุนของสกรู (R1)) ผลการทดลองได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า T1 ที่ 250 องศาเซลเซียส, R1 350 รอบต่อนาที กากสบู่ดำยังคงมีสารระเหยคงเหลือร้อยละ 73.979 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับกากสบู่ดำตั้งต้นที่มีร้อยละของสารระเหย 74.352 นั่นคือ ไอน้ำที่มีในกากสบู่ดำทั้งหมดถูกกำจัดออกไป และสารระเหยถูกกำจัดออกไปเพียงเล็กน้อย แต่ผลการทดลองที่ T1 550 องศาเซลเซียส, R1550 รอบต่อนาที กากสบู่ดำยังคงมีสารระเหยคงเหลือที่ 67.197 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับช่วง T1 450 องศาเซลเซียส, R1 550 รอบต่อนาที เนื่องจากช่วงการอบแห้งนี้ ไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 550 องศาเซลเซียส และเป็นช่วงที่เข้าใกล้อุณหภูมิมิสูงสุดที่ชุดอุปกรณ์อบแห้งนี้จะรองรับได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าช่วงการอบแห้งที่ T1 ที่ 350 และ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้ R1 550 รอบต่อนาที.

ภายใต้ข้อกำหนดให้ช่วงการอบแห้งที่ T1 ที่ 350 และ 450 องศาเซลเซียสนี้ โดยกำหนดให้แปรผัน R1 ที่ 450, 550 และ 650 รอบต่อนาที พบว่า ที่อุณหภูมิช่วงการอบแห้งเดียวกันนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรูขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีแนวโน้มลดลงทั้งที่อุณหภูมิ 350 และ 450 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เป็นผลจากที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้นนั้น กากสบู่ดำมีเวลาอยู่ในสกรูน้อย ตั้งแต่ 3.50-1.50 นาที ที่ความเร็วรอบ R1 450, 550 และ 650 รอบต่อนาที ตามลำดับ.

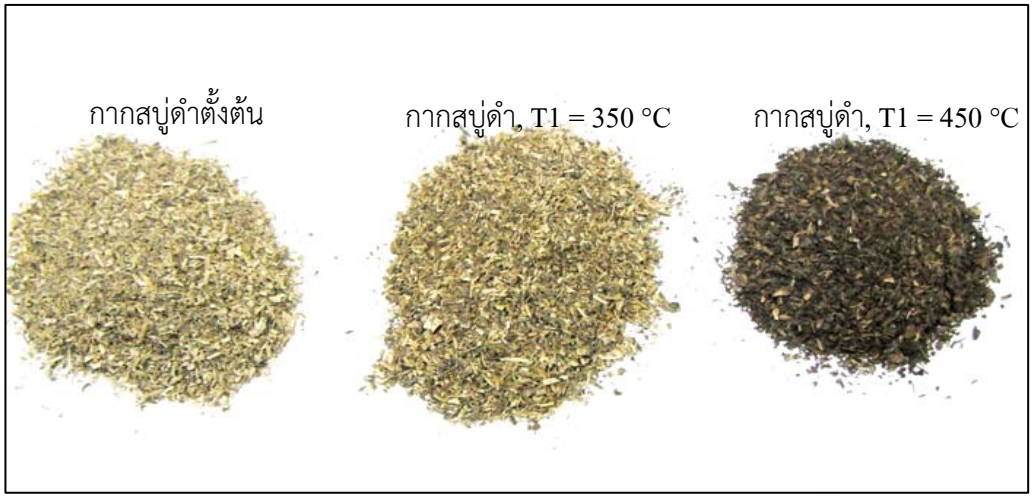
ตารางที่ 4.5 สารระเหยที่คงเหลือในช่วงการอบแห้ง

อุณหภูมิ (TI) (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบ (RI) (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	ร้อยละของสารระเหย
กากสบู่ดำตั้งต้น	-	-	74.352
250	350	4.50	73.979
350	450	3.50	70.160
350	550	2.50	71.495
350	650	1.50	71.773
450	450	3.50	66.000
450	550	2.50	68.763
450	650	1.50	69.058
550	550	2.50	67.197

กากสบู่ดำเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีสีที่เข้มขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 16 พบว่า T1 ที่ 450 องศาเซลเซียส R1 450 รอบต่อนาที กากสบู่ดำที่ได้มีลักษณะภายนอกที่ไหม้ดำและสารระเหยคงเหลือร้อยละ 66.00 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเกินไปไม่เหมาะสมต่อการนำมาทดลอง พิจารณาโดยรวมแล้วสารระเหยคงเหลือดังแสดงในตารางที่ 15 พบว่า ค่า R1 ที่ 550 รอบต่อนาที ที่ช่วงอุณหภูมิ 350 และ 450 องศาเซลเซียส มีค่าสารระเหยคงเหลือที่ไม่แตกต่างจากที่ R1 ที่ 450 และ 650 รอบต่อนาที.



รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ในช่วงการอบแห้ง.

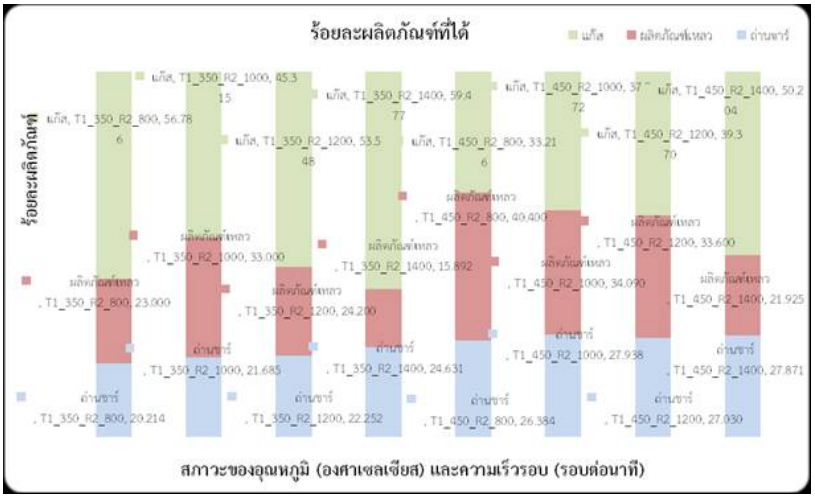


รูปที่ 4.2 กากสบู่ดำตั้งต้นและกากสบู่ดำในช่วงการอบแห้ง.

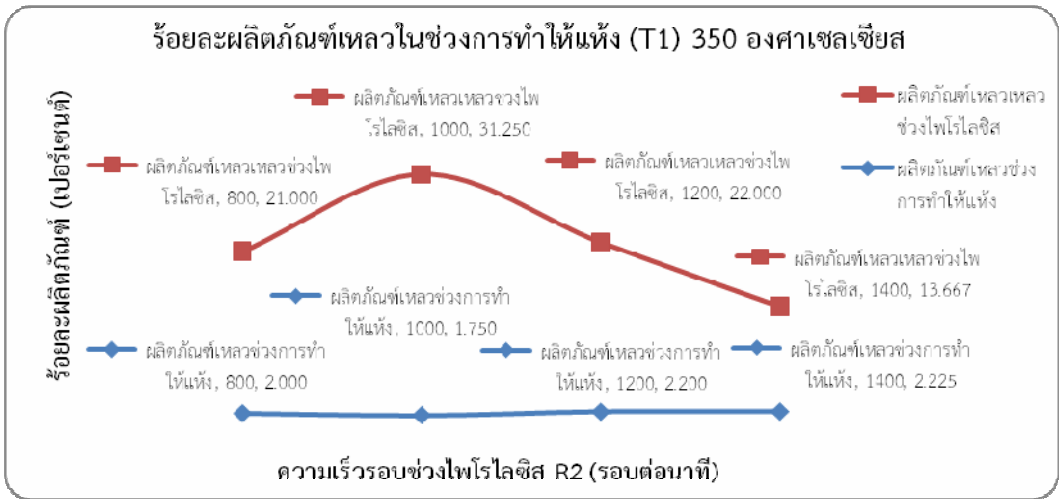
4.2.3 ผลผลิตที่ได้ในช่วงการไพโรไลซิส

จากการทดลองช่วงการอบแห้งที่เหมาะสม ให้ T1 ที่ 350 และ 450 องศาเซลเซียส ที่ R1 550 รอบต่อนาทีและกำหนดให้ช่วงการไพโรไลซิส T2 ที่ 650 องศาเซลเซียสนั้น การทดลองเพื่อหาผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ถ่านชาร์ และแก๊สภายใต้ตัวแปร R2 800, 1,000 1,200 และ 1,400 รอบต่อนาที ผลที่ได้ที่ดังแสดงในรูปที่ 4.3.

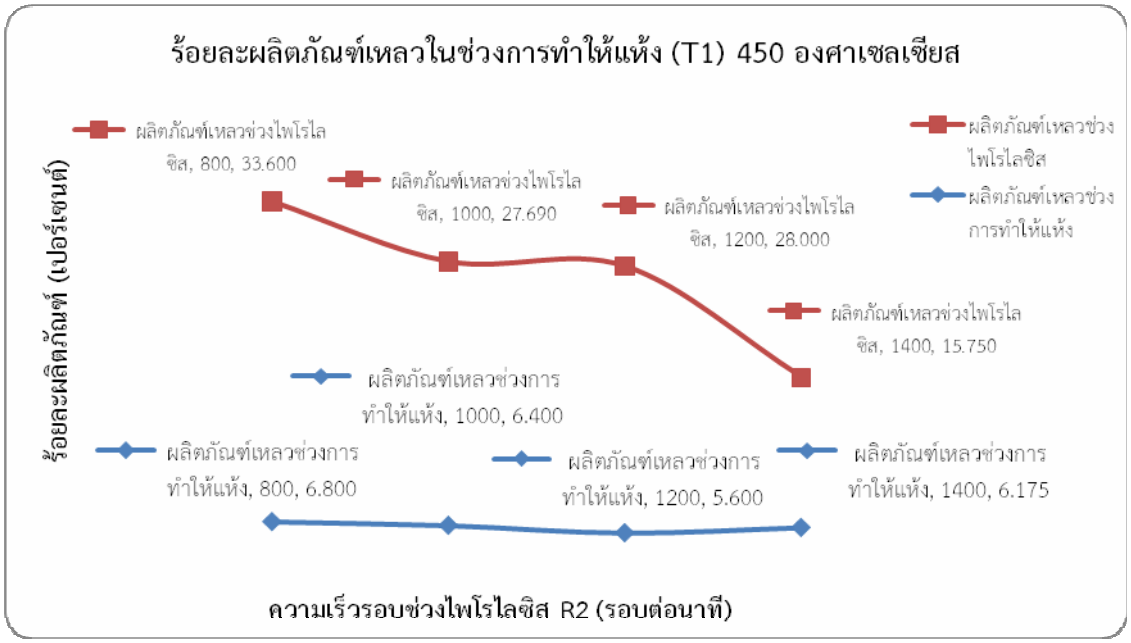
ที่ช่วงการอบแห้งที่อุณหภูมิ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุดที่ร้อยละ 31.250 และที่ T1 450 องศาเซลเซียส, R2800 รอบต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุดที่ร้อยละ 33.60 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ทั้งนี้ ที่ T1 350 และ 450 องศา-เซลเซียส, R1 550 รอบต่อนาที และ T2 650 องศาเซลเซียส, R2 1,400 รอบต่อนาที ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวน้อยที่สุด อีกทั้งยังเป็นของเหลว สีน้ำตาลใส ไม่มีความหนืด ที่มีลักษณะต่างจากผลิตภัณฑ์เหลวในสภาวะอื่นๆ จึงไม่ทำการคัดเลือกตัวแปรดังกล่าวมาพิจารณาในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันชีวภาพในขั้นตอนต่อไป.



รูปที่ 4.3 ผลิตภัณฑ์เหลว, ถ่านชาร์ และแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในสภาวะต่างๆ.



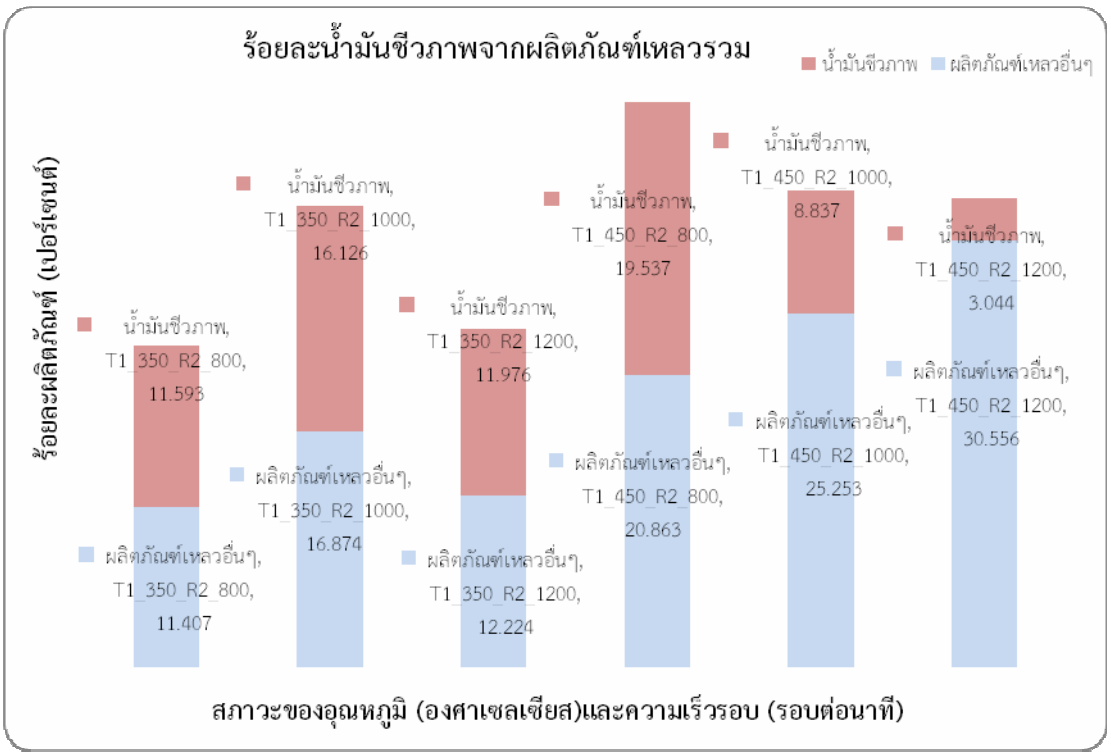
รูปที่ 4.4 ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกากสบู่ดำที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที ในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงไพโรไลซิส.



รูปที่ 4.5 ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกากสบู่ดำที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาทีในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงไพโรไลซิส.

4.2.4 ผลผลิตที่ได้

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนอกจากได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นน้ำมันชีวภาพแล้วยังได้รวมถึงของแข็งเป็นถ่านอีกด้วย โดยสภาวะที่ทำการศึกษาจาก T1 350 และ 450 องศาเซลเซียส, R1 550 รอบต่อนาทีในช่วงการอบแห้ง และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเร็วรอบของไพโรไลซิส คือ T2 650 องศาเซลเซียส, R2 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที พบว่า T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาทีในช่วงการอบแห้ง และ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาทีได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 19.54 และ 16.13 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีลักษณะข้นหนืด เป็นสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 4.7.



รูปที่ 4.6 น้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงการอบแห้งและความเร็วรอบต่างๆ ช่วงไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส.

(1) (2)

หมายเหตุ (1) ที่อุณหภูมิช่วงอบแห้ง 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที
(2) อุณหภูมิช่วงอบแห้งที่ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.7 น้ำมันชีวภาพที่ความเร็วรอบของช่วงการอบแห้ง 550 รอบต่อนาที และอุณหภูมิช่วงไพโรไลซิสที่ 650 องศาเซลเซียส.

4.2.5 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ

กระบวนการอบแห้งและไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นน้ำมันชีวภาพนั้น และนำไปหาสัดส่วนองค์ประกอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) เพื่อหาค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ พบว่า ที่สภาวะที่ 1 (T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที) และสภาวะที่ 2 (T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที) น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนเท่ากับ 24.88 และ 21.64 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนที่ 15-20 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (Grierson 2009) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากสบู่ดำนั้น ให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชีวมวลประเภทอื่นๆ.

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพพบว่า ในสภาวะที่ 1 น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนสูงกว่าที่สภาวะที่ 2 แต่ผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้ที่สภาวะที่ 2 สูงกว่าสภาวะที่ 1 คือ ร้อยละ 19.54 และ 16.13 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับค่าพลังงานความร้อนรวมของน้ำมันชีวภาพที่สามารถผลิตได้ที่สภาวะที่ 2 คือ 422.74 เมกกะจูล ในขณะที่สภาวะที่ 1 ได้ 401.18 เมกกะจูล ดังแสดงในตารางที่ 4.6.

ตารางที่ 4.6 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้

สภาวะที่	ค่าความร้อน (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	ร้อยละของ น้ำมันชีวภาพ	ค่าความร้อนรวม (เมกกะจูล)
1	24.88	16.13	401.18
2	21.64	19.54	422.74

หมายเหตุ: สภาวะที่ 1 คือ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที

สภาวะที่ 2 คือ T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ พบว่า องค์ประกอบของธาตุคาร์บอนสูงสุดในสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 คือ 58.49 และ 46.91 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลจากองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพ ที่ได้รับความร้อนแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดการสลายตัวทางด้านเคมีของเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนินต่างกัน (Antal and Michael 1983) โดยทั่วไปส่วนประกอบของแข็งในน้ำมันชีวภาพ มีค่าร้อยละโดยน้ำหนักของแข็งในช่วง 0.2 -1 (3) ในการศึกษาครั้งนี้พบของแข็งในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 เป็นร้อยละ 0.50 และ 0.41 ตามลำดับ.

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้แบบแยกธาตุ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	สภาวะที่ 1	สภาวะที่ 2
คาร์บอน (C)	58.49	46.91
ไฮโดรเจน (H)	7.48	7.49
ออกซิเจน (O)	31.07	43.30
ไนโตรเจน (N)	2.25	1.82
กำมะถัน (S)	0.71	0.48
รวม	100.00	100.00

หมายเหตุ: สภาวะที่ 1 คือ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที
สภาวะที่ 2 คือ T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที

น้ำมันชีวภาพจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งปริมาณของไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง โดยที่ปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อน ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยที่สภาวะที่ 1 มีองค์ประกอบไฮโดรเจนร้อยละ 7.48 คาร์บอนร้อยละ 58.48และค่าความร้อน 24.88 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม. สำหรับที่สภาวะที่ 2 มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนร้อยละ 7.49 คาร์บอนร้อยละ 46.91 และค่าความร้อน 21.64 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุไฮโดรเจนและคาร์บอนยังไม่สามารถบ่งชี้ได้อย่างแน่ชัดว่า น้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนที่สูงนั้นเป็นน้ำมันชีวภาพที่ดี ผลการวิเคราะห์ของกลุ่มชนิดน้ำมันหรือแต่ละชนิดของธาตุองค์ประกอบ จึงจะสามารถทำให้การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันชีวภาพมีความถูกต้องขึ้น นอกจากคุณสมบัติที่สามารถใช้ได้ในยานยนต์แล้วการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อผลิตน้ำมันที่มีคุณภาพที่เหมาะสม คุ้มทุน ยังต้องได้รับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป.

4.2.6 องค์ประกอบของถ่าน

ผลวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากกากสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน แสดงให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในช่วงการอบแห้งและอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสกากสบู่ดำ โดยถ่านที่ผลิตได้จากสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 มีค่าความร้อนเท่ากับ 23.48 และ 24.93 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8.

ตารางที่ 4.8 ค่าความร้อนน้ำมันชีวภาพและถ่านที่ได้

สภาวะที่	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน
1	24.88	23.48
2	21.64	24.93

หมายเหตุ สภาวะที่ 1 คือ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที
สภาวะที่ 2 คือ T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองสภาวะที่ 2 มีค่าความร้อนสูงกว่าสอดคล้องกับปริมาณของคาร์บอนคงตัว โดยค่าคาร์บอนคงตัวนี้ ถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของถ่าน Demirbas (1997) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ค่าความร้อนที่สูงยังสามารถอธิบายการสลายตัวทางความร้อนของสารระเหยในสบู่ดำที่มากกว่า จึงมีสารระเหยเหลืออยู่ในถ่านต่ำ.

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบของถ่านที่ได้แบบประมาณ

ผลวิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	สภาวะที่ 1	สภาวะที่ 2
ความชื้น (Moisture)	0.000	0.000
เถ้า (Ash)	20.699	21.040
สารระเหย (Volatiles)	22.311	18.880
คาร์บอนคงตัว (Fix carbon)	56.990	60.777
รวมทั้งหมด (Total)	100.000	100.000

หมายเหตุ สภาวะที่ 1 คือ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที
สภาวะที่ 2 คือ T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านพบว่า ในสภาวะที่ 1 องค์ประกอบของคาร์บอนสูงกว่าในสภาวะที่ 2 คือ ร้อยละ 63.36 และ 67.66 ตามลำดับ โดยที่สัดส่วนของไฮโดรเจนมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10.

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบของถ่านที่ได้แบบแยกธาตุ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	สภาวะที่ 1	สภาวะที่ 2
คาร์บอน (C)	63.36	67.66
ไฮโดรเจน (H)	2.86	2.43
ออกซิเจน (O)	29.29	24.95
ไนโตรเจน (N)	4.20	4.70
กำมะถัน (S)	0.29	0.26
รวม	100.00	100.00

หมายเหตุ สภาวะที่ 1 คือ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที
สภาวะที่ 2 คือ T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที

ถ่านเป็นผลผลิตรองที่ได้กระบวนการซึ่งคุณสมบัติความเป็นถ่านพิจารณาจากค่าความร้อน (ค่าคาร์บอนและไฮโดรเจนมีความสัมพันธ์ต่อค่าความร้อน) จากผลการทดลองนี้ ค่าไฮโดรเจนที่ได้ค่อนข้างคงที่ จึงสามารถพิจารณาองค์ประกอบคาร์บอนที่มีผลต่อค่าความร้อนได้โดยตรง ซึ่งองค์ประกอบคาร์บอนในถ่านที่สภาวะที่ 2 มีค่าสูงกว่าสภาวะที่ 2 จึงได้ค่าความร้อนสูงเป็น 24.93 และ 23.48 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ, การเผาอิฐ และการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น เนื่องจากมีสารระเหยน้อยและซัลเฟอร์ต่ำจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม. นอกจากนี้ ถ่านยังมีความพรุนในตัว ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวลมาก จึงสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารอื่นๆ ได้.

4.2.7 องค์ประกอบของแก๊ส

องค์ประกอบของแก๊สที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟ พบว่า ทั้ง 2 สภาวะมีองค์ประกอบที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.11.

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากสบู่ดำ

สภาวะที่	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	H_2	CO	CO_2	Other
1	3.96	0.99	0.48	0.47	12.46	4.71	76.95
2	3.76	0.91	0.47	0.68	11.25	4.76	78.17

หมายเหตุ สภาวะที่ 1 คือ T1 350 องศาเซลเซียส, R2 1,000 รอบต่อนาที
สภาวะที่ 2 คือ T1 450 องศาเซลเซียส, R2 800 รอบต่อนาที

องค์ประกอบของแก๊สที่ได้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยที่แก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ส่วนแก๊สอนินทรีย์ ได้แก่ มีเทน, เอทิลีน และอีเทน การศึกษาองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ของทั้งสองสภาวะ (สภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2) กำหนดให้ความร้อนช่วงไพโรไลซิสคงที่ที่ 650 องศาเซลเซียส และแปรผันอุณหภูมิในช่วงการอบแห้ง องค์ประกอบของแก๊สอนินทรีย์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนหรือการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยที่องค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากกากสบู่ดำนั้น มีคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 11.85, คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 4.73, ไฮโดรเจนร้อยละ 0.57, มีเทนร้อยละ 3.86, เอทิลีนร้อยละ 0.90 และอีเทนร้อยละ 0.48.

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน สามารถสรุปได้ ดังนี้

- สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ คือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที ในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ในช่วงการไพโรไลซิส ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้ มีค่าสูงสุด 24.878 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม.
- สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ คือ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาที ในช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ในช่วงการไพโรไลซิส ได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุด ร้อยละ 19.54.

6. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

6.1 ผลผลิตที่ได้จากโครงการ

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน สำหรับใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากชีวมวล รวมถึงองค์ความรู้ด้านการผลิตน้ำมันชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางภาคการเกษตร หรือชีวมวลประเภทต่างๆ ซึ่งสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัยระดับเชิงพาณิชย์ได้.

6.1.1 บทความที่ตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน

ได้มีการนำเสนอในงานประชุมวิชาการจำนวน 2 เรื่อง

- การประชุมวิชาการ “The 1st ASEAN Plus Three Graduate Research Congress (AGRC 2012)” เรื่อง “Bio-oil Production from Palm Shell via Extrude-screw Pyrolyzer” (1-2 มีนาคม 2555).
- การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาการและเทคโนโลยี ครั้งที่ 1 ประจำปี พ.ศ. 2557 เรื่อง “การผลิตน้ำมันชีวมวลจากกากสบู่ดำโดยการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูด้วยเทคนิคการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ” (23 พฤษภาคม 2557).

6.1.2 สิทธิบัตร

มีการจดสิทธิบัตรจำนวน 1 เรื่อง คือ กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยระบบทำความร้อนแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ปฏิกรณ์แบบสกรูสองขั้นตอน.

6.2 กลุ่มเป้าหมายการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

กลุ่มเป้าหมายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์ และผลลัพธ์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.1

กลุ่มเป้าหมายด้านอุตสาหกรรม คือ ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมที่สนใจด้านการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลประเภทต่างๆ เพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ทั้งในสถานประกอบการในภาคอุตสาหกรรมเอง หรือเพื่อการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ตลอดจนกลุ่มอุตสาหกรรมผู้ผลิตปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ทั้งนี้ น้ำมันชีวภาพมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัตถุดิบต้นทางสำหรับการผลิตสารเคมีที่มีมูลค่าสูงได้ โดยองค์ความรู้เหล่านี้สามารถนำไปใช้พัฒนาต่อยอดเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ทางเคมีและเชื้อเพลิงทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับแนวทางและนโยบายการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและ

พลังงานทางเลือกให้ถึงร้อยละ 30 ตามเป้าหมายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (AEDP 2015) โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

กลุ่มเป้าหมายด้านงานวิจัย คือ สถาบันการศึกษาตลอดจนสถาบันวิจัยต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน ซึ่งสามารถนำความรู้ที่ได้นี้ไปพัฒนาต่อยอดงานวิจัย เพื่อสั่งสม เพิ่มเติมและขยายองค์ความรู้ให้ทั้งนักศึกษา, อาจารย์ และนักวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานด้านพลังงานทดแทน เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพและสารเคมีต่างๆ จากชีวมวล ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้ในอนาคต.

ตารางที่ 6.1 กลุ่มเป้าหมาย หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์ ผลลัพธ์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

กลุ่มเป้าหมาย (ภาคอุตสาหกรรม/บริการ/สังคมชุมชน)	หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	รูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์/การนำไปต่อยอดให้เกิดมูลค่าเพิ่ม	ผลลัพธ์จากการนำไปใช้ประโยชน์	ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม
ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมด้านการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนจากชีวมวลประเภทต่างๆ เพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ทั้งนี้ยังสามารถขยายสู่อุตสาหกรรมการผลิตสารเคมีที่มีมูลค่าสูงได้	กลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ได้รับการสนับสนุนจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน	การผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาและสารเคมีต่างๆ จากชีวมวล	เพิ่มโอกาสใหม่และการขยายตัวของธุรกิจด้านพลังงานทดแทนจากชีวมวลและเป็นทางเลือกในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตสารเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	- ส่งเสริมให้มีจำนวนอุตสาหกรรมด้านพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น - เป็นพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ด้านปิโตรเคมีภัณฑ์ได้ - ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลจากต่างประเทศและสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ
สถาบันการศึกษาและหน่วยงานด้านการวิจัยและพัฒนา	สถาบันการศึกษาและหน่วยงานด้านการวิจัยและพัฒนาทั้งภาครัฐและเอกชน	นำองค์ความรู้ไปพัฒนาเพื่อต่อยอดงานวิจัยทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์	สั่งสมและเพิ่มฐานข้อมูลด้านงานวิจัยและการผลิตพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก	องค์ความรู้, งานวิจัยเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาการผลิตและปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพต่อไปในอนาคต

7. ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการพัฒนาแนวทางการผลิตน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอนซึ่งยังมีศักยภาพในการที่จะปรับปรุงและพัฒนาต่อยอด เพื่อเพิ่มพูนความรู้และความเข้าใจทางด้านวิศวกรรมและการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ ดังนี้

- ปรับปรุงระบบการควบแน่นของเหลวของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกรูสองขั้นตอน ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพได้มากขึ้น.
- ควรทำการเปิดสวิตช์เพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับการอุ่นเครื่องก่อนการผลิต ในระยะเวลาที่เท่ากันทุกครั้งเพื่อให้ได้ปริมาณและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ
- วัตถุดิบชีวมวลที่เลือกใช้ควรมีขนาดและความแข็งที่เหมาะสม ต่อการป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส หากวัตถุดิบมีขนาดใหญ่หรือมีความแข็งมากเกินไปเครื่องมืออาจติดขัดหรือไม่สามารถทำงานได้.
- ถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นตัวดูดซับหรือทำเป็นถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังนำไปปรับสภาพดินให้ร่วนซุย มีความพรุนถ่ายเทอากาศได้ดี หรือนำไปขึ้นรูปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงแข็งได้.
- ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณแก๊สที่เป็นผลพลอยได้จากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากแก๊สที่ปล่อยออกมาให้เกิดประโยชน์สูงสุด.
- หาชีวมวลชนิดอื่นๆ มาทำการทดลองผลิตน้ำมันชีวภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ กับผลจากการทดลองในงานวิจัยนี้.

8. เอกสารอ้างอิง

กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2559. คุณสมบัติและองค์ประกอบของการสบู่ดำ. กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนและการปรับค่าเป้าหมายตามแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศ. กรุงเทพฯ. 2558.

เจริญรัถ, สุรพงษ์. 2548. เทคโนโลยีชาวบ้าน, ปีที่ 1 ฉบับที่ 368

แหวนเพ็ชร, สุพจน์. 2552. การผลิตน้ำมันชีวมวลจากผักตบชวาโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธนกิจธรรมกุล, กีรติณัฏฐ์. 2553. การผลิตน้ำมันชีวมวลจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฤกษ์หิรัญโชติ, ธนิฎา; โชคเฮงตระกูล, ศุภนันทร์ และดวงจันทร์, อภิญญา. 2550. น้ำมันชีวมวลจากการสลายมวลชีวภาพประเภทหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Antal, Jr., Michael, Jerry., 1983. Biomass pyrolysis: a review of the literature part 1-carbohydrate pyrolysis. Advances in solar energy. Springer New York, pp. 61-111.

Antony Raja, S. *et al*., 2010. Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically neated fluidized bed reactor Energy, **35** (7), pp. 2,819-2,823.

Asadullah, M. *et al*., 2007. Production of bio-oil from fixed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, **86**, pp. 2,514-2,520.

Boateng, A.A., Jung, H.G. and Alder, P.R., 2006. Pyrolysis of energy crops including alfafa stems, reed canary grass and eastern gamagrass. *Fuel* **85**, pp. 2,450-2,457.

Bridgwater, Anthony Victor, and Alejandro Jose Alcala Canales., 2012. Bio-Fuel composition and method for manufacture of bio-fuel composition U.S. Patent Application No. 14/240, 212.

Demirbas, A., 1997. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* **76**, pp. 431-434.

Dickerson, Theodore and Juan Soria., 2013. Catalytic fast pyrolysis: a review. *Energies* **6**(1), pp. 514-538.

Faisal Abnisa, W.M.A., Wan Daud, and Sahu, J.N., 2011. Optimization and characterization studies on bio oil production from palm shell by pyrolysis using reponse surface methodology. *Bio mass and Bio energy*, **35**, pp. 3,604-3,616.

Grieson, Scott. *et al*., 2009. Thermal characterization of microalgae under slow pyrolysis conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **85**(1), pp. 118-123.

Sung Won Kim. *et al*., 2013. Bio-oil from the pyrolysis of palm and Jatropha wastes in a fluidized bed Fuel Processing Technology, **108,** pp. 118-124.

Jourabchi, Seyed Amirmostafa, Suyin Gan, and Hoon Kiat, Ng., 2014. Pyrolysis of Jatropha curcas pressed cake for bio-oil production in a fixed-bed system. *Energy Conversion and Management* **78**, pp. 518-526.

Jones, J., 2016. Pyrolysis. New Zealand: Massey University.

Karaosmanogle, F., and Tetik, E., and Gollu., 1999. Bio fuel production using slow pyrolysis of the straw and stalk of the rapeseed plant, *Fuel Processing Technology*, **59**, pp. 1-12.

Mullen, Charles A. *et al*., 2010. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and bioenergy*, **34**(1), pp. 67-74.

Manurung, R. *et al*., 2009. Valorisation of Jatropha curcas L. plant parts: Nut shell conversion to fast pyrolysis oil. *Food and Bio products Processing*, **87**(3), pp. 187-196.

Onay, Ozlem., 2007. Influence of pyrolysis temperature and heating rate on the production of bio-oil and char from safflower seed by pyrolysis, using a well-swept fixed-bed reactor. *Fuel Processing Technology*, **88**(5), pp. 523-531.

Pütün, Ayse E. *et al*., 2005. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. *Fuel Processing Technology*, **86**(11), pp. 1,207-1,219.

Park, Hyun Ju, *et al*., 2008. Effects of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of Japanese larch. *Chemical Engineering Journal*, **143**(1), pp. 124-132.

Power Engineering Intermation. 2000. **8**(7) August 2000.

Zheng, Ji-lu, Wei-ming Yi and Na-na, Wang, 2008. Bio-oil production from cotton stalk. *Energy Conversion and Management* **49**(6), pp. 1,724-1,730.

ภาคผนวก

9.1 ภาคผนวก ก: เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

9.1.1 เครื่องบดชีวมวล

เครื่องบดชีวมวลยี่ห้อ Retsthรุ่น SM 2000 โดยบดกากสบู่ดำผ่านตะแกรงแยกขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดลอง โดยขนาดดังกล่าวเป็นขนาดที่มีเหมาะสมต่อเครื่องมือ Two-stage Screw Pyrolyzer.

รูปที่ 9.1 เครื่องบดชีวมวล.

9.1.2 เครื่องวิเคราะห์ความชื้น

สำหรับการวิเคราะห์วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิต ยี่ห้อ Memmert

รูปที่ 9.2 เครื่องวิเคราะห์ความชื้น.

9.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

ประกอบด้วย เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจนยี่ห้อ TrueSpec® CHN เครื่องมือวิเคราะห์กำมะถันยี่ห้อTrueSpec® S และคอมพิวเตอร์ประมวลผล.

รูปที่ 9.3 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.

9.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

เตาเผาสำหรับวิเคราะห์เถ้ายี่ห้อ Griffin& George Limited รุ่น phase 1 no. 8- 65 178 (ภาพซ้าย) และเตาเผาสำหรับวิเคราะห์สารระเหย ยี่ห้อ Carbolite (ภาพขวา).

รูปที่ 9.4 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ.

9.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อน

ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความร้อนยี่ห้อ Parr รุ่น 6300,Voltage stabilizer ยี่ห้อ Powercomและ Water recirculation ยี่ห้อ Parr รุ่น 6520 A.

รูปที่ 9.5 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อน

9.1.6 เครื่องระเหยแบบสุญญากาศ

ยี่ห้อ BÜCHI สำหรับการกลั่นสลายผลิตภัณฑ์เหลวเพื่อแยกน้ำมัน ประกอบด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Rotavapor) รุ่น R 205 อ่างน้ำร้อน (Heating bath) รุ่น B 490 เครื่องควบคุมสุญญากาศ (Vacuum controller) รุ่น V 850 เครื่องปั๊มสุญญากาศ.

รูปที่ 9.6 เครื่องระเหยแบบสุญญากาศ.

9.1.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ยี่ห้อ Varian รุ่น 450-GC

สำหรับวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ ยี่ห้อ Varian รุ่น 450-GC

รูปที่ 9.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ยี่ห้อ Varian รุ่น 450-GC.

9.2 ภาคผนวก ข: วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพของชีวมวล

9.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

9.2.1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

- อบถ้วยใส่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 -30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ เพื่อทำให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักบันทึกผล.
- ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง.
- อบตัวอย่างพร้อมถ้วยใส่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างที่คงที่.
- นำถ้วยใส่ตัวอย่างออกจากเตาอบและทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ เป็นเวลา 30 นาที บันทึกผล.
- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 (W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักถ้วยใส่ตัวอย่างกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักถ้วยใส่ตัวอย่างกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

9.2.1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

■ อบถ้วยใส่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 15-30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ เพื่อทำให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักบันทึกผล.

■ ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง.

■ นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.

■ นำออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็นนำใส่ในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล.

■ สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3-W_4) / W$$

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

W_3 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

9.2.1.3 ปริมาณสารระเหย (VolatileMatter): ASTM D3175

■ อบครูซิเบิลพร้อมฝา (Nickel - chromium alloy crucible + cover) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 -30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ เพื่อทำให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักบันทึกผล.

■ ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ลงในครูซิเบิลที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง.

■ เผาตัวอย่างในครูซิเบิลที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสในเตาเผาเป็นเวลา 40 นาที (หรือเมื่ออุณหภูมิถึง 950 องศาเซลเซียส).

■ นำครูซิเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล.

■ สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

W_5 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

M = ร้อยละความชื้น

9.2.1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

- สูตรที่ใช้การคำนวณ

  ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 – M – A – V

  เมื่อ M = ร้อยละความชื้น

  A = ร้อยละของเถ้า

  V = ร้อยละของสารระเหย