

การกำจัดหน้าคาโดยไฟโรไลซิสแบบเร็วเป็นน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์สกรูคู่

ร้อยเอก กิตติภาพ พรหมดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

DISPOSAL OF COGONGRASS(*IMPERATA CYLINDRICA*)AS BIO-OIL BY FAST  
PYROLYSIS IN TWIN SCREW REACTOR

Captain Kittiphop Promdee

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Environmental Science  
Department of Environmental Science(Interdisciplinary Program)  
Chulalongkorn University Academic Year 2012  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดหญาคาโดยไฟโรไลซิสแบบเร็วเป็นน้ำมัน  
ชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์สกรูคู่

โดย

ร้อยเอกกิตติภพ พรหมดี

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์

---

บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

กิตติภาพ พรหมดี : การกำจัดหญ้าคาโดยไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นน้ำมันชีวภาพในเครื่อง  
ปฏิกรณ์สกรูคู่ (DISPOSAL OF COGONGRASS (*IMPERATA CYLINDRICA*) AS BIO-  
OIL BY FAST PYROLYSIS IN TWIN SCREW REACTOR)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์, 102 หน้า.

การกำจัดหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นการแปรรูปชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดประโยชน์ ซึ่งได้แก่ น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ โดยกำหนดอุณหภูมิในช่วง 400 – 500 องศาเซลเซียส การศึกษาในครั้งนี้มีความมุ่งหมายที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพระหว่างปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ โดยพิจารณาจากผลได้ของน้ำมันชีวภาพ สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันชีวภาพเป็นตัวเปรียบเทียบจากผลการคำนวณและวิเคราะห์พบว่า ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ มีสถานะที่เป็นของเหลว สูงสุดอยู่ที่ 58.75 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการแยกอยู่ที่ 37.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ซึ่งมีค่าผลได้สูงสุดอยู่ที่ 55.23 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 38.76 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี พบว่า ชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบมาก 5 อันดับแรก ต่อไปนี้ คือ Phenol, Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine, 2-methyl, 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl และ Phenol, 3-methyl โดยที่น้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่มีปริมาณ Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine, 2-methyl และ 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl ที่มากกว่า น้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ปริมาณคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ (53.23 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) มีค่าสูงกว่าปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (51.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เล็กน้อย และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ (33.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าต่ำกว่าปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (38.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) น้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่มีความร้อนที่ปลดปล่อยมากกว่าน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ทุกช่วงอุณหภูมิ ค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยของความหนืดต่ำ (0.353 ปาสคาลวินาที) เช่นเดียวกับน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ (0.354 ปาสคาลวินาที) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพทั้งจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่มีค่าเป็นกรด คือ 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ น้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ มีค่าการกักความร้อนค่อนข้างสูง ส่วนน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวมีค่าการกักร้อนปานกลาง จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้างต้นพบว่า น้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่มีคุณลักษณะทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพที่ดีกว่าน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

ภาควิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....  
สาขาวิชา...วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2555.....

## 5272523920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORDS: TWIN SCREW FEEDER/ CONTINUOUS PYROLYSIS REACTOR/ BIO-OIL/ COGONGRASS/ RECEIVED OIL YIELDS

KITTIPHOP PROMDEE : DISPOSAL OF COGONGRASS (*IMPERATA CYLINDRICA*) AS BIO-OIL BY FAST PYROLYSIS IN TWIN SCREW REACTOR.

ADVISOR : ASSOC.PROF THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 102 pp.

This study describes the conversion of cogongrass using a process of pyrolysis which converts biomass into fuel products, i.e. bio-oil and char coke, at a controlled temperature in the range of 400 – 500 °C. This study was proposed to compare the efficiency between single screw and twin screw pyrolysis reactors in the production of bio-oil noting specifically the received oil yield and the chemical and physical properties of the bio-oil product. The results of analysis found that the liquid phase from pyrolysis with the twin screw reactor at 500 °C was highest at 58.75 %, and contained 37.39 % bio-oil compared to the bio-oil yield of the single screw reactor at 500 °C which had a liquid phase of 55.23 % and contained 33.76 % bio-oil. The GC-MS analysis found the 5 highest concentrations of hydrocarbon compounds to be Phenol, Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine 2-methyl, 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl and Phenol 3-methyl. Bio-oil from the twin screw reactor had more Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine, 2-methyl and 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl than the single screw reactor bio-oil product. Carbon content of the bio-oil from the twin screw (53.23 wt.%) was higher than in the bio-oil from the single screw (38.23 wt.%). The bio-oil from the twin screw had higher heating values than the bio-oil from the single screw reactor at all temperatures. The viscosity of the bio-oil from the single screw had a low point (0.353 Pascal/min) at 25 °C, which was the same as the bio-oil from the twin screw (0.354 Pascal/min). The pH of the bio-oil from the single screw and twin screw were 1.5 and 2.5 respectively. The bio-oil from the twin screw has dark tarnish and bio-oil from single screw has moderate tarnish. The analyses and comparatives found that the bio-oil from twin screw has better characteristics both in term of quantities and qualities from single screw.

Department: ...Environmental Science... Student's signature.....

Field of Study: ...Environmental Science ... Advisor's signature.....

Academic Year.....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆ ด้าน รวมทั้งให้คำชี้แนะที่มีประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัย พร้อมกันนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาจอง ประทีตสุนทรसार ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยความสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยอย่างดีเสมอมา และกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย ที่คอยชี้แนะและให้ข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงเนื้อหางานวิจัยให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่โครงการก่อสร้างและวิจัยโรงงานต้นแบบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อ.แก่งคอย จ.สระบุรี ทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และคุณอนุภาพของพุทธศาสนาที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวและผลักดันต่อข้าพเจ้าที่สำคัญที่สุด

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

### บทที่

1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
	1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
	2.1 หญ้าคา.....	8
	2.2 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	9
	2.3 การไพโรไลซิส.....	13
	2.4 ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	16
	2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	18
	2.6 หลักการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลที่เกี่ยวข้องกับไพโรไลซิส.....	20
	2.7 ผลกระทบตัวแปรต่างๆ ต่อการไพโรไลซิส.....	23

บทที่	หน้า
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	31
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	32
3.3 วิธีการทดลอง.....	32
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของผลิตภัณฑ์.....	33
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	40
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของหญ้าคา.....	40
4.1.1 การวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเนื้อเยื่อของหญ้าคา.....	40
4.1.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของหญ้าคา (Ultimate analysis).....	41
4.2 ผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	42
4.2.1 การกำหนดตัวแปรด้านอุณหภูมิเพื่อศึกษาผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	42
4.2.2 การกำหนดตัวแปรรอบสกรูเพื่อศึกษาผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	46
4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	48
4.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS).....	48
4.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.....	53
4.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน.....	53
4.3.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน.....	54
4.3.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ.....	55
4.3.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง.....	55
4.3.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อนมาตรฐาน.....	55



4.4 ผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญาคําของปฏิภรณ์สกรูคู้จําการ กําหนดตัวแปรด้านอุณหภูมิ.....	56
4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของนํ้ามันชีวภาพที่ได้จําการ ไพโรไลซิสหญาคําของปฏิภรณ์สกรูเดี่ยว.....	60
4.5.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตรกราฟี- แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS).....	60
4.5.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.....	65
4.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยคําความร้อน.....	65
4.5.4 วิเคราะห์คําความหนืดมาตรฐาน.....	66
4.5.5 วิเคราะห์จุดวบบไฟ.....	67
4.5.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง.....	67
4.5.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อนมาตรฐาน.....	67
4.6 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จําการไพโรไลซิสหญาคําของปฏิภรณ์สกรู เดี่ยว และสกรูคู้.....	68
4.7 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของนํ้ามันชีวภาพที่ได้จําการ ไพโรไลซิสหญาคําของปฏิภรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู้.....	73
4.7.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตรกราฟี- แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS).....	73
4.7.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.....	77
4.7.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยคําความร้อน.....	79
4.7.4 วิเคราะห์คําความหนืดมาตรฐาน.....	80
4.7.5 วิเคราะห์จุดวบบไฟ.....	82
4.7.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง.....	82
4.7.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อนมาตรฐาน.....	82

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	83
5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของหญ้าคา.....	83
5.1.2 ผลกระทบที่ได้จากการไฟโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และ สกรูคู่.....	84
5.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จาก การไฟโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	94
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	102

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเนื้อเยื่อและโครงสร้างของชีวมวลจำพวกหญ้าและถั่ว.....	10
2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของชีวมวลจำพวกหญ้าและถั่ว.....	12
2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของชีวมวลจำพวกหญ้าและถั่ว.....	12
4.1 องค์ประกอบเนื้อเยื่อของหญ้าคา.....	41
4.2 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของหญ้าคา.....	41
4.3 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเบาเมื่อทำการแยกออกจากของเหลวทั้งหมด ด้วยปัจจัยด้านอุณหภูมิ.....	44
4.4 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเบาเมื่อทำการแยกออกจากของเหลวทั้งหมด ด้วยปัจจัยด้านอุณหภูมิ.....	47
4.5 สารประกอบทางเคมีที่พบในน้ำมันชีวภาพด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว.....	52
4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์ สกรูเดี่ยว.....	53
4.7 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ.....	54
4.8 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเบาเมื่อทำการแยกออกจากของเหลวทั้งหมด ด้วยปัจจัยด้านอุณหภูมิ.....	58
4.9 สารประกอบทางเคมีที่พบในน้ำมันชีวภาพด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูคู่.....	64
4.10 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์ สกรูคู่.....	65
4.11 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ.....	66
4.12 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์ สกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	77
4.13 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่ .....	79

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ภาพรวมของกระบวนการไฟโรไลซิสของงานวิจัย.....	5
2.1	หน้าค่า และส่วนประกอบของหน้าค่าจากแหล่งโรงเรียนนายร้อยพระ- จุลจอมเกล้า.....	8
2.2	ผังการแปรรูปเนื้อเยื่อพืชในรูปลิกโนเซลลูโลสเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ.....	10
2.3	ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูเดี่ยว.....	16
2.4	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูเดี่ยว.....	17
2.5	เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูคู่.....	17
2.6	โครงสร้างระบบสกรูคู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส.....	18
2.7	กระบวนการแปรรูปทางความร้อน.....	20
3.1	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูเดี่ยว.....	31
3.2	ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูเดี่ยว.....	32
3.3	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูคู่.....	34
3.4	ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสกรูคู่.....	35
3.5	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	37
3.6	เครื่องรีโอมิเตอร์.....	38
3.7	เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN Analyzer.....	38
3.8	เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	39
3.9	แผ่นเทียบสีการกักความร้อนมาตรฐาน.....	39
4.1	หน้าค่า และ ส่วนประกอบของหน้าค่า.....	40
4.2	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิสหน้าค่าด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	42
4.3	ผลได้เฉลี่ยของแก๊สที่ได้จากการไฟโรไลซิสหน้าค่าด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	43
4.4	ปริมาณแก๊สชนิดต่างๆ ที่ได้จากไฟโรไลซิสหน้าค่าด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่.....	43
4.5	ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไฟโรไลซิสหน้าค่าด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว.....	44
4.6	ผลได้เฉลี่ยของถ่านชาร์จากการไฟโรไลซิสหน้าค่าด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว.....	45

ภาพที่	หน้าที่	
4.7	สัดส่วนของผลได้เฉลี่ยของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคา ด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว ด้วยตัวแปรด้านอุณหภูมิ.....	45
4.8	ผลได้เฉลี่ยของแก๊สจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว.....	46
4.9	ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว.....	47
4.10	ผลได้เฉลี่ยของถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว.....	47
4.11	สัดส่วนของผลได้เฉลี่ยของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคา ด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว ด้วยตัวแปรรอบสกรู.....	48
4.12	โครมาโทแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบ สกรูเดียว.....	49
4.13	โครมาโทแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบ สกรูเดียวเปรียบเทียบกับ Blank (เส้นสีดำ) และช่วงเวลาปฏิบัติการ (operate) ณ ช่วงเวลา และอุณหภูมิ จากเส้นลายสีชมพูและเขียว ตามลำดับ.....	49
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและผลได้ของประเภทสารประกอบ- ไฮโดรคาร์บอนจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี.....	50
4.15	สเปกตรัมของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน; Phenol และ 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl.....	51
4.16	สเปกตรัมของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน; Benzene, 1-ethyl-4-methoxy และ Phenol, 2,5-dimethyl.....	51
4.17	ค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ.....	54
4.18	การกักกรองของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยปฏิกรณ์ สกรูเดียว.....	55
4.19	น้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วย ปฏิกรณ์สกรู.....	56
4.20	ผลได้เฉลี่ยของแก๊สจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรู.....	57
4.21	ปริมาณแก๊สชนิดต่างๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรู.....	57
4.22	ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรู.....	58
4.23	ผลได้เฉลี่ยของของแข็งจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรู.....	59

ภาพที่		หน้าที่
4.24	สัดส่วนของผลได้เฉลี่ยของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคา ด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว ด้วยตัวแปรด้านอุณหภูมิในปฏิกรณ์สกรูคู่.....	59
4.25	โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วย ปฏิกรณ์สกรูคู่.....	60
4.26	โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบ สกรูคู่เปรียบเทียบกับ Blank (เส้นสีดำ) และช่วงเวลาปฏิบัติการ (operate) ณ ช่วงเวลา และอุณหภูมิ จากเส้นลายสีชมพูและเขียวตามลำดับ.....	61
4.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและผลได้ของประเภทสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี.....	61
4.28	สเปกตรัมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ; Pyridine,2-methyl และ Phenol,3- methyl.....	62
4.29	สเปกตรัมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ; Benzene, 1-ethenyl-3-methyl และ 2-Methyl-1,3-oxathiolane.....	63
4.30	ค่าความหนืดของน้ำมันหนักที่อุณหภูมิต่างๆ.....	66
4.31	สภาพการกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของหญ้าคาด้วย ปฏิกรณ์สกรูคู่.....	67
4.32	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (ก) และปฏิกรณ์ สกรูคู่ (ข).....	68
4.33	ผลได้เฉลี่ยของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์- สกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	68
4.34	ชนิดและปริมาณแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และ สกรูคู่.....	69
4.35	ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์- สกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	70
4.36	ผลได้เฉลี่ยของน้ำมันชีวภาพที่แยกได้จากของเหลวทั้งหมดจากการไพโรไลซิสหญ้า คาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	71

ภาพที่	หน้าที่	
4.37	ผลได้เฉลี่ยของถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญาาคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและ สกรูคู่.....	72
4.38	โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากหญาาคาด้วยการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์ สกรูเดี่ยว.....	73
4.39	โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากหญาาคาด้วยการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์ สกรูคู่.....	74
4.40	สเปกตรัมของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญที่พบได้ในน้ำมันชีวภาพ จากหญาาคาทั้งปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่.....	75
4.41	การเปรียบเทียบปริมาณของชนิดสารประกอบทางเคมีบางชนิดจากน้ำมันชีวภาพจาก หญาาคาในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่.....	76
4.42	ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญาาคาของ ปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่.....	78
4.43	ค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (screw I) และ สกรูคู่ (screw II) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	80
4.44	แสดงค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (screw I) และสกรูคู่ (screw II) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	81
4.45	แสดงค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (screw I) และสกรูคู่ (screw II) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส .....	81
4.46	การกััดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากหญาาคาที่ได้จากการไพโรไลซิสจากปฏิกรณ์ สกรูเดี่ยว (ก) และสกรูคู่ (ข).....	82

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

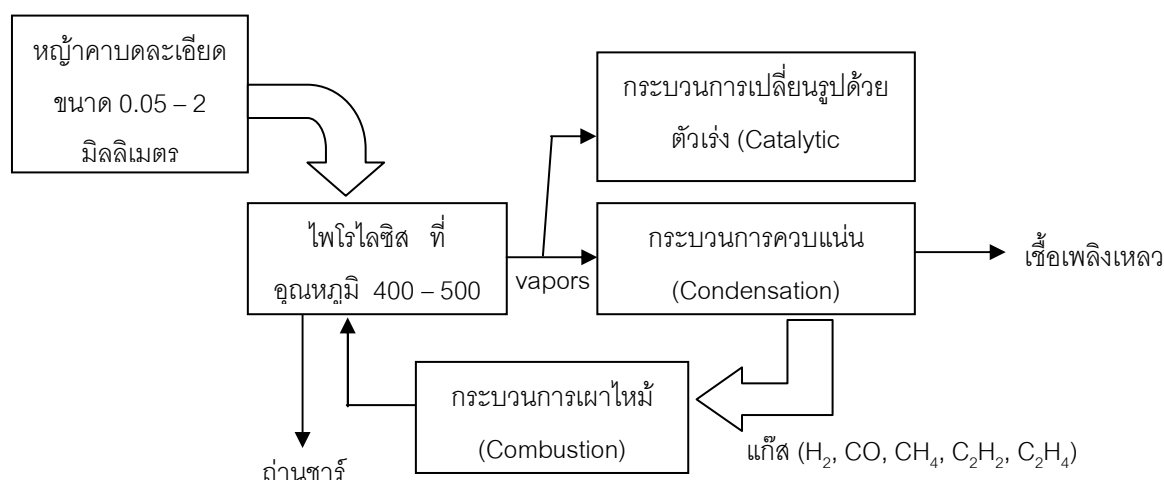
ปัญหาการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร หรือวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ มักจะจบด้วยการเผาทำลายซึ่งเป็นวิธีที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศอย่างมาก การกำจัดวัสดุดังกล่าวที่มีประสิทธิภาพ และได้ประโยชน์สูงสุดคือการแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลวและแก๊สโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่ให้ความร้อนอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสในที่อับอากาศ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการทำไพโรไลซิสแบบเร็วจะให้ผลได้ (yield) ของน้ำมันชีวภาพที่ค่อนข้างสูง (40-70 เปอร์เซ็นต์)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งคือหญ้าคามมาเป็นน้ำมันชีวภาพให้มีผลได้ที่สูง โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้ปฏิกรณ์สกรูคู่และให้ความร้อนกับหินกรวดกลมที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500°C โดยสกรูคู่จะทำหน้าที่ช่วยให้การสัมผัสระหว่างวัตถุดิบกับหินกรวดกลมได้ดีและมีการถ่ายโอนความร้อนที่รวดเร็ว ตัวแปรที่ศึกษานอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมี อัตราการป้อนวัตถุดิบ ความชื้นวัตถุดิบ อัตราการป้อนไนโตรเจนเพื่อช่วยในการเหนี่ยวนำให้น้ำมันหลุดออกจากตัววัตถุดิบ งานวิจัยนี้ยังมีการเปรียบเทียบการการผลิตน้ำมันชีวภาพโดยการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวแบบให้ความร้อนจากขดลวดความร้อนภายนอกปฏิกรณ์ซึ่งวัตถุดิบจะได้รับความร้อนจากผนังท่อโดยมีการศึกษาตัวแปรเหมือนกับปฏิกรณ์สกรูคู่ สุดท้ายมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์ทั้งสองแบบ

ชีวมวลเป็นอินทรีย์สารมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้งคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้ พลังงานทางเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ สะสมอยู่ในรูปของโครงสร้างชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และ ลิกนิน (lignin) ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลหรือพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ และในปัจจุบันก็เป็นที่นิยมการนำชีวมวลชนิดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชีวมวลที่เหลือใช้จากกิจกรรมต่างๆ หรือ ชีวมวลที่เป็นวัชพืช มาใช้ประโยชน์ในรูปการแปรสภาพเป็นพลังงานด้วยกระบวนการไพโรไลซิส



ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส หรือ ที่เรียกกันว่า น้ำมันชีวภาพ ยังมีชื่อเรียกกันในชื่ออื่นๆ อีก อาทิ pyrolysis oil, biocrude-oil, bio-fuel-oil, liquid smoke, pyrolysis tar, pyrolytic acid เป็นต้น ซึ่งน้ำมันชีวภาพ ที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ น้ำตาลเข้ม หรือ อาจเป็นสีแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และวิธีการให้ความร้อน (slow หรือ fast pyrolysis) น้ำมันชีวภาพมีกลิ่นเฉพาะ ซึ่งสามารถทำให้เกิดระคายเคืองได้เป็นเวลานาน ความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพจะอยู่ในช่วง 25-1,00 cSt (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) ซึ่งขึ้นกับปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพ ค่าความเป็นกรดต่าง ของน้ำมันชีวภาพค่อนข้างต่ำ คือ มี pH ประมาณ 2-4 เนื่องมาจากมีองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ (Mei-Kuei Lee et al., 2010; Mullen and Boateng, 2008) ในการจัดเก็บควรเลือกใช้วัสดุที่สามารถป้องกันการกัดกร่อน ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าต่ำ (17-19 MJ/kg) เมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น (42-44 MJ/kg) (Asadullah et al., 2007; Demirbas A., 2009)



ภาพที่ 1 ภาพรวมของกระบวนการไพโรไลซิสของงานวิจัย

โดยผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด (ของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส) ที่ได้จากการไพโรไลซิส สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการอบแห้ง ของเหลวที่ได้ อาจใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือสกัดสารเคมี ถ่านไม้ อาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือนำไปกระตุ้นต่อ เพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของเชื้อเพลิงซึ่งมีข้อดี คือ สะดวกในการจัดเก็บ และการขนส่ง ซึ่งในอนาคตน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสจะสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทน ในรูปของวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นในทางเคมีต่อไปได้

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระบบเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตประจำวันและปัจจัยที่ทำให้ประเทศขับเคลื่อนไปข้างหน้าทั้งในด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรมและภาคธุรกิจบริการในแต่ละปีความต้องการใช้พลังงานเพื่อตอบสนองความต้องการพื้นฐานมีอัตราส่วนที่สูง การจัดการด้านพลังงานภายในประเทศให้มีความต้องการที่เพียงพอและต้นทุนที่เหมาะสมเป็นไปได้ยาก เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งพลังงานที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ไม่เพียงพอ ประกอบกับการที่ประเทศไทยต้องพึ่งพาพลังงานนำเข้าจากต่างประเทศ และได้รับผลกระทบจากวิกฤติราคาน้ำมันแพงและสถานการณ์ความไม่มั่นคงทางการเมืองขณะนี้ ส่งผลให้ประเทศตกอยู่ในความเสี่ยงที่ราคาน้ำมันถูกกำหนดโดยผู้ค้า ดังนั้น การประยุกต์ใช้ปรัชญา หลักเศรษฐกิจพอเพียงตามแนวพระราชดำริของ “พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว” ในกิจการพลังงานของประเทศ โดยมุ่งเน้นใช้พลังงานอย่างรู้คุณค่า รู้จักเลือกใช้ เเท่าที่จำเป็นเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ โดยพิจารณาเลือกใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่ในประเทศ หรืออยู่ในชุมชนก่อนเป็นอันดับแรก สามารถที่จะแก้ไขการขาดดุลการค้าเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งราคาสินค้าเกษตรเมื่อเทียบกับราคาน้ำมันแล้วยังอยู่ในระดับต่ำกว่า ดังนั้นเพื่อความมั่นคงด้านพลังงาน ความเพียงพอมีใช้อย่างทั่วถึงและราคาเป็นธรรม ประเทศไทยจะเป็นฝ่ายรับอย่างที่เคยเป็นมา หรือมีทางเลือกใหม่ที่ประเทศกำหนดเองและสามารถเปลี่ยนเป็น “ตั้งรุก” ได้การเปลี่ยนประเทศโดยการ “ตั้งรุก” คือการที่เปลี่ยนจากการเป็นผู้ซื้อและนำเข้าพลังงานอย่างเดียว มาเป็นผู้ขาย (supply side) หรือผู้ผลิตน้ำมันบ้าง โดยพิจารณาจุดแข็งที่ประเทศมีศักยภาพโดยเฉพาะด้านการเกษตรกรรม

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรกรรมเป็นจำนวนมากการกำจัดโดยการเผาทิ้งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปอย่างไร้ประโยชน์ การนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมันและถ่านหิน ทั้งยังช่วยลดการขาดดุลการค้า ส่งเสริมการประกอบอาชีพของเกษตรกร เป็นต้น อีกทั้งชีวมวลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเป็นเชื้อเพลิงสะอาดซึ่งปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>), ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ที่ส่งผลต่อสภาวะโลกร้อน (global warming)

ชีวมวลเป็นอินทรีย์สารมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้งคาร์บอน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ ที่สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้ พลังงานทางเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ สะสมอยู่ในรูปของโครงสร้างชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose)

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลหรือพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้

กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพกระทำได้โดยไฮเทคโนโลยีกการแปรรูปทางความร้อน (thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (pyrolysis), แก๊สซิฟิเคชัน (gasification), ลิกควิฟแฟคชัน (liquidfaction) และการเผาไหม้ (combustion) โดยไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนในภาวะที่ไม่มีอากาศ หรือออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊ส น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลาและชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูง จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แก๊สที่ได้ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์สกรูคู่ และเครื่องปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว
2. เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์สกรูคู่ที่มีหีบรวดกลมเป็นตัวให้ความร้อนภายในปฏิกรณ์ กับเครื่องปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวที่ให้ความร้อนจากภายนอกปฏิกรณ์
3. ศึกษาองค์ประกอบและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจาก ปฏิกรณ์สกรูคู่ และ ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการไพโรไลซิสด้วยระบบให้ความร้อนปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยใช้หีบรวดกลมที่มีความคงทนและสามารถรับและถ่ายโอนความร้อนได้ดี
2. ศึกษาโดยใช้วัตถุดิบ คือ หญ้าคา ที่ถูกกำจัดในขั้นต้นโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก
3. ศึกษาสมบัติทางเคมีและผลผลิตที่ได้ของน้ำมันชีวภาพ ตลอดจนการศึกษเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างน้ำมันชีวภาพที่ได้จากระบบการใช้หีบรวดกลมที่ให้ความร้อนสัมผัสกับวัตถุดิบโดยตรงในสกรูคู่ กับ ระบบการได้รับความร้อนจากผนังท่อของสกรูเดี่ยว

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การผลิตน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาเหลือทิ้งในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

1. ค้นคว้าเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

2. ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อผลที่ได้ของน้ำมันชีวภาพ (oil yield) ถ่านชาร์ และแก๊ส โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ และอัตราการป้อนวัตถุดิบ

3. ศึกษาผลของการป้อนไนโตรเจนที่มีต่อผลที่ได้ของน้ำมันชีวภาพ ที่ภาวะเหมาะสมจากข้อ 2

4. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของหญ้าคา

4.1 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis: fixed carbon, volatile matter, ash and moisture)

4.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis: C, H, N, S, and O)

5. วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพ และวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส

5.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)

5.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis: C, H, N, S, and O)

5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value)

5.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer

5.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ASTM D 93

5.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)

5.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

ส่วนที่ 2 การผลิตน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาเหลือทิ้งในปฏิกรณ์สกรูคู่

6. ค้นคว้าเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปฏิกรณ์สกรูคู่ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ
7. ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อผลที่ได้ของน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ อัตราการป้อนวัตถุดิบ และอัตราการป้อนหินกรวดกลมเพื่อให้ความร้อน
8. ศึกษาผลของการป้อนไนโตรเจนที่มีต่อผลที่ได้ของน้ำมันชีวภาพ ที่ภาวะเหมาะสม
9. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของหญ้าคา

9.1 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis: fixed carbon, volatile matter, ash and moisture)

9.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis: C, H, N, S, and O)

10. วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพ และวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส

10.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)

10.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis: C, H, N, S, and O)

10.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value)

10.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer

10.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ASTM D 93

10.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)

10.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

ส่วนที่ 3 การเปรียบเทียบผลผลิตน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบ คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากหญ้าคาเหลือทิ้งในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและปฏิกรณ์สกรูคู่

11. ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและปฏิกรณ์สกรูคู่

12. เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพ และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส ที่ได้จากการไพโรไลซิสจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและปฏิกรณ์สกรูคู่

13. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากหญ้าคา ในรูปของน้ำมันชีวภาพ และ ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบสกรูคูโดยใช้หินกรวดกลมให้ความร้อน และกระบวนการไพโรไลซิสแบบสกรูเดี่ยวโดยใช้การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสกับเตาให้ความร้อน
2. ได้แนวทางการจัดการของเสียที่เกิดจากหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสทั้งสองแบบ ซึ่งช่วยลดมลพิษทางอากาศจากการเผาทำลายหญ้าคา
3. น้ำมันชีวภาพที่สังเคราะห์ได้ สามารถนำไปแปรรูปกลั่นแยกแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ หรือใช้เป็นสารตั้งต้นใน การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้านปิโตรเคมีได้ในอนาคตต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หญ้าคา

หญ้าคา มีชื่อสามัญคือ Cogongrass และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Imperata cylindrical* (L.) P. Beauv. อยู่ในวงศ์ Gramineae เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุหลายปี มีเหง้าสีเขียวแข็งอยู่ใต้ดิน ลำต้นตั้งตรง สูงได้ถึง 30 - 160 เซนติเมตร (Ludovic et al., 2008) มีกาบใบโอบหุ้มอยู่ กาบใบค่อนข้างเรียบ และริมกาบใบมีขน ตัวใบยาวเรียว ยาวประมาณ 1 - 2 เมตร กว้างประมาณ 4 - 18 มิลลิเมตร ส่วนกลางใบกว้างกว่าโคนใบ และปลายใบ มีขนเป็นกระจุกอยู่ระหว่างรอยต่อของตัวใบ และกาบใบ ออกดอกเป็นช่อยาวประมาณ 5 เซนติเมตร การปลูกหญ้าคาใช้เมล็ด หรือไหล (stolen) ปลูกง่าย ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา เป็นวัชพืชที่พบได้ทั่วไป



ภาพที่ 2.1 หญ้าคา และส่วนประกอบของหญ้าคา จากแหล่งโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

จากงานวิจัยของ Ludovic et al., (2008) พบว่า หญ้าคามีการแพร่กระจายเมล็ดพันธุ์โดยทั้งทางกระแสลม และ เหง้าใต้ดิน เหง้าสามารถกระจายตัวและประสานกันได้สูงถึง 6-8 นิ้วบนผิวดิน และอาจมีมวลมากถึง 80% ของมวลทั้งหมด ซึ่งเป็นระบบเหง้าที่ทำให้พืชชนิดนี้ยากที่จะควบคุมเป็นอย่างยิ่ง การกำจัดส่วนเหนือพื้นดินของหญ้าคาสามารถทำได้ง่ายตาย แต่การกำจัดส่วนที่อยู่ใต้ดินได้แก่ ราก เหง้า ไหล ทำได้ยากมาก โดยไม่สามารถกำจัดให้ตายไปก่อนที่ต้นอ่อนจะงอกขึ้นมาใหม่ เพราะหญ้าคามีการงอกใหม่ที่รวดเร็วมาก ลักษณะของใบ ที่เป็นขอบหยาบซึ่งอาจบาด หรือตัดลิ้นของสัตว์แทะเล็ม ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ทำให้หญ้าคาไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกเพื่อเป็นพืชอาหารสัตว์ ที่ต่ำ

## 2.2 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

### 2.2.1 องค์ประกอบของเนื้อเยื่อและโครงสร้างของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวล คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาล ซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides)

#### 1) เซลลูโลส

จากงานวิจัยของ Demirbas (2009) พบว่า เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของไม้ ที่มีอยู่ประมาณ 40 % เมื่อเซลลูโลสได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส ในสุญญากาศ จะให้ลิวโกลูโคแซน (1,6-anhydroglucopyranose) ประมาณ 38 %

ลิวโกลูโคแซน (levoglucosan) นี้จะไวต่อความร้อนมาก และ ยังสลายตัวให้ กรดอะซีติก อารีโดน ฟีนอล และ น้ำ ลิวโกลูโคแซน มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส สามารถระเหยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ และเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

Shafizadeh and Chin (1977) ได้ทำการศึกษาทดลองการไพโรไลซิสเซลลูโลสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันปกติ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์พบว่า ได้ถ่านชาร์ 34.2 % น้ำมันดิบ 19.1% และอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะได้ถ่าน 9 % น้ำมันดิบ 66 % ส่วนที่เหลือเป็นกรดไพโรลิกเนียส แก๊ส และน้ำ

#### 2) เฮมิเซลลูโลส

จากผลการศึกษาของ Shafizadeh and Chin (1977) พบว่า เฮมิเซลลูโลสพีช โดยทั่วไปจะประกอบด้วยเพนโตซาน (pentosan) เป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วยไซเลน (xylane) และอะราเบน (araban) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือไม่มากนักเป็นเฮกโซแซน (hexosan) ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสนี้ถ้าเป็นเฮกโซแซนจะไม่ต่างจากเซลลูโลสมากนัก เนื่องจากโครงสร้างของโมโนเมอร์คล้ายคลึงกัน ส่วนปฏิกิริยาไพโรไลซิสของเพนโตซา อาจแตกต่างจากเซลลูโลส แต่ก็ไม่มีการศึกษามาก เช่น เซลลูโลส เพราะการสกัดเอาเพนโตซาบริสุทธิ์จะทำได้ยาก ดังนั้น Shafizadeh and Chin (1977) จึงได้ทำการไพโรไลซิสไซเลนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ได้ถ่านชาร์ 31.1 % น้ำมันดิบ 15.7 % ของเหลวอื่นๆ 30.6 % และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7.9 %.

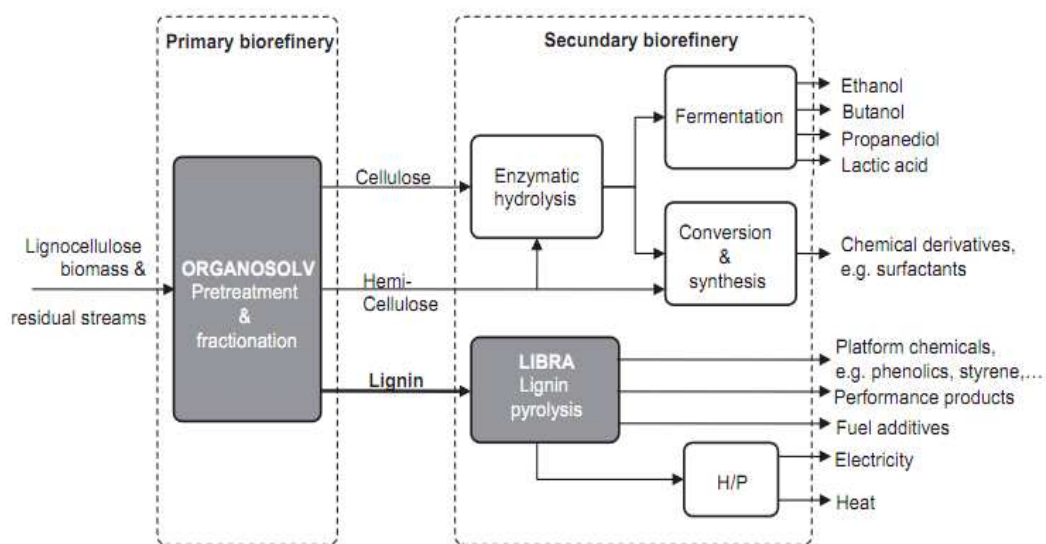


### 3) ลิกนิน

องค์ประกอบของลิกนิน เป็นสารอะโรมาติกชนิด ฟีนิลโพรเพน ลิกนินก็เช่นเดียวกับเฮมิเซลลูโลส คือ เป็นพอลิเมอร์ชนิด อัดแน่น มีโครงสร้างของมอโนเมอร์หลายแบบ จึงเป็นการยากที่จะนำลิกนินแต่ละตัวมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายใต้ปฏิกิริยาไพโรไลซิส ดังเช่น เซลลูโลสจากการศึกษาปฏิกิริยาไพโรไลซิสรวมของลิกนินโดย Shafizadeh and Chin (1977) ที่ อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส พบว่า ผลิตรัตน์ที่ได้เป็นถ่าน 55 % น้ำมันดิบ 15 % ของเหลว 20 % และก๊าซชนิดต่างๆ อีก 12 %

**ตารางที่ 2.1** องค์ประกอบทางเนื้อเยื่อและโครงสร้างของชีวมวลจำพวกหญ้า และถั่ว (Mullen and Boateng, 2008)

	switchgrass	alfalfa-early bud	alfalfa-full flower
Cellulose (g/kg)	321	275	306
Hemicellulose (g/kg)	284	205	217
Lignin (g/kg)	163	158	175



**ภาพที่ 2.2** ผังการแปรรูปเนื้อเยื่อพืชในรูปลิกนินเซลลูโลสเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ (Wild et al., 2012)

## 2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลจากการวิเคราะห์

Mullen and Boateng (2008) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจากพืชพลังงาน 2 ชนิด โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากพืชชนิดแรก คือ หญ้าสวิช (Switchgrass) และพืชอีกชนิด คือ ถั่วอัลฟาฟา (Alfalfa) (นำมาวิจัย 2 ระยะพัฒนาการ คือ 1) ระยะพัฒนาอ่อน และลำต้น และ 2) ระยะโตเต็มที่และมีการออกดอก) ทั้ง 2 ชนิด คือ พืชที่ให้พลังงาน และจัดเป็นพืชอาหารสัตว์ในการปศุสัตว์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS และ HPLC. และทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่ความดัน 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ภายในเตาปฏิกรณ์. สารเคมีทั้ง 62 ชนิด มีสมบัติเป็นของเหลวที่ชัดเจน ในจำนวนนั้นมี 27 ชนิดที่สามารถระบุปริมาณองค์ประกอบของสารได้ และได้ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของพืชทั้งสองชนิดนี้พบว่า เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวม (proximate analysis) หญ้าสวิช มีค่า volatile matter สูงสุดที่ 83.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนในถั่วอัลฟาฟา มีค่าอยู่ในช่วง 73-75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ หญ้าสวิชยังมีปริมาณเถ้า (ash) ที่ต่ำ คือ 2.61 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนในถั่วอัลฟาฟา มีค่าอยู่ในช่วง 5 - 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนค่า fixed carbon หญ้าสวิช มีค่า อยู่ที่ 13.98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนในถั่วอัลฟาฟา มีค่าอยู่ในช่วง 18-19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) พบว่า หญ้าสวิช มีค่า คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน สูงสุดที่ 47.53, 6.81 และ 42.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนในถั่วอัลฟาฟา มีค่า คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ประมาณ 45, 5.48 และ 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง GC-MS และ HPLC พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากหญ้าสวิช มีสารองค์ประกอบที่สำคัญในปริมาณมากดังนี้ คือ levoglucosan, acetic acid, และ acetol ส่วนน้ำมันชีวภาพที่ได้จากถั่วอัลฟาฟา มีสารองค์ประกอบที่สำคัญในปริมาณมากดังนี้ คือ acetic acid, acetol และ phenol จากการทดลองสรุปได้ว่า หญ้าสวิช มีองค์ประกอบที่ดีกว่า ถั่วอัลฟาฟา ในหลายๆ ด้าน รวมถึงมีประสิทธิภาพด้านความเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงเหลวในรูปแบบต่างๆ ต่อไป

ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส หรือ ที่เรียกกันว่า น้ำมันชีวภาพ ยังมีชื่อเรียกกันในชื่ออื่นๆ อีก อาทิ pyrolysis oil, biocrude-oil, bio-fuel-oil, liquid smoke, pyrolysis tar, pyrolytic acid เป็นต้น ซึ่งน้ำมันชีวภาพ ที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ, น้ำตาลเข้ม หรือ อาจเป็นสีแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และวิธีการให้ความร้อน ( slow หรือ fast pyrolysis) (Coulson and Bridgewater, 2005) น้ำมันชีวภาพมีกลิ่นเฉพาะ ซึ่งสามารถทำให้เกิด

ระคายเคืองได้เป็นเวลานาน ความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพจะอยู่ในช่วง 25-1,00 cSt (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) ซึ่งขึ้นกับปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพ ค่าความเป็นกรดต่าง ของน้ำมันชีวภาพค่อนข้างต่ำประมาณ pH 2-4 เนื่องจากมีองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ ในการจัดเก็บควรเลือกใช้วัสดุที่สามารถป้องกันการกัดกร่อน ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น

**ตารางที่ 2.2** การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของชีวมวลของพืชจำพวกหญ้า และถั่ว (Mullen and Boateng, 2008; Promdee et al., 2011)

Proximate analysis (wt.%)	Switch grass	Manila grass	alfalfa-early bud	alfalfa-full flower
Fixed carbon	13.98	21.5	17.87	18.88
Volatile matter	83.41	59.5	73.39	75.29
Ash	2.61	18.00	8.74	5.83
Moisture	*	0.58	*	*

\* ค่าความชื้นของ Proximate analysis อาจมีค่าน้อยมาก จึงไม่ได้แสดงผลการวิเคราะห์

**ตารางที่ 2.3** การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบแยกธาตุของชีวมวลของพืชจำพวกหญ้า และถั่ว (Mullen and Boateng, 2008; Promdee et al., 2011)

Ultimate analysis (wt.%)	Switch grass	Manila grass	alfalfa-early bud	alfalfa-full flower
C	47.53	49.5	44.30	45.97
H	6.81	6.90	5.43	5.52
O	42.54	40.60	38.20	40.58
N	0.51	3.00	2.52	1.60
S	0.00	0.25	0.22	0.088

## 2.3 การไพโรไลซิส

การไพโรไลซิส คือ กระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในที่อับอากาศที่ช่วงอุณหภูมิ 500 - 800 องศาเซลเซียส โดยได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และ แก๊สไฮโดรคาร์บอน), ของเหลว (สารละลายอินทรีย์ และน้ำมันดิบ (tar)) และของแข็ง (ถ่านไม้) (Coulson and Bridgewater, 2005; Mullen and Boateng, 2008) ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพ และวิธีการให้ความร้อน มวลชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ได้แก่ เศษพืชที่เหลือจากการเกษตร หรือ จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น ชานอ้อย , ฟางข้าว เปลือกข้าว หนุ่ย ไม้ และ เปลือกไม้ ชนิดต่างๆ เป็นต้น ส่วนวิธีการให้ความร้อนแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้ (Alencar, 1983) คือ

1) Conventional pyrolysis หรือ Slow pyrolysis ซึ่งจะทำการไพโรไลซิสโดยอัตราการให้ความร้อนน้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที และอุณหภูมิที่ใช้น้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันดิน และถ่านไม้

2) Flash หรือ Fast pyrolysis ซึ่งจะให้อัตราความร้อนอยู่ในช่วง 10-10,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที และอุณหภูมิละหว่าง 400-1,000 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ แก๊ส และของเหลวเป็นส่วนใหญ่

Gercel (2011) ได้ทำการศึกษาวิจัยในหัวข้อ การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฝ้ายดอกอิสเซิล (*Onopordum acanthium L.*) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า จากเตาปฏิกรณ์แบบฟิกเบดรีแอคเตอร์ (fixed-bed reactor) ที่อุณหภูมิ 350, 400, 500, 550 และ 700 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคของชีวมวลระหว่าง 0.6 – 0.85 มิลลิเมตร โดยได้ผลได้ของน้ำมัน (liquid oil yields) และองค์ประกอบทางเคมี ที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.6 – 0.85 มิลลิเมตร ผลได้ของน้ำมันชีวภาพ 18.5 – 27.3 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น เปอร์เซ็นต์ โดยรวมของน้ำมันชีวภาพที่เพิ่มขึ้นประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ หลังจากมีการเติมตัวคะตะลิสต์ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ ของการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์โดยแก๊สโครมาโตกราฟี และสเปคโตรสโคปี พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากฝ้ายดอกอิสเซิล สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทน และใช้เป็นวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นในทางเคมีต่อไปได้

สุพจน์ (2552) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพโดยตัวแปรที่ทำการศึกษ ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อน อัตราการไหลของแก๊สตัวพา ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 400, 425, 450, 475 และ 500

องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ช่วงขนาด ได้แก่ อนุภาคน้อยกว่า 425 ไมโครเมตร, 425-600 ไมโครเมตร และ 600 ไมโครเมตร-1มิลลิเมตร อัตราการป้อนสาร 1.29, 1.4, 1.6, 1.8 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 0, 50, 100, 150, 200, 400 มิลลิลิตร/นาที พบว่า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่ 425-600 ไมโครเมตร อัตราการป้อนที่ 1.4 กิโลกรัม/ชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 มิลลิลิตร/นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสแบบเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์เหลวร้อยละ 38.23 แก๊สร้อยละ 43.36 และถ่านชาร์ร้อยละ 21.10 โดยที่ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว (38.23%) แบ่งได้สองส่วน คือ น้ำมันเบา (22.98 %)และน้ำมันหนัก (15.25%) ค่าความร้อนน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก 41.05 และ 31.0 เมกกะจูล ต่อ กิโลกรัม ตามลำดับ คุณสมบัติทางเคมีของไบโอออยล์พบปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันเบามากกว่ามากกว่าในน้ำมันหนัก และน้ำมันทั้งสองมีสภาพเป็นกรดและมีซัลเฟอร์ที่สามารถละลายในอะซีโตนและไฮโดรฟูแรนได้ดี การกักกรองแผ่นทองแดงน้ำมันเบาและหนักอยู่ในระดับเล็กน้อย วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดพบ หมู่ฟังก์ชัน ไฮดรอกไซด์ อัลคีน คีโตน คาร์บอกซิลิก และเอโรแมติก วิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปีพบองค์ประกอบหลักในน้ำมันเบา ได้แก่ 1,3-ไซโคลเพนเทนไดโอน 2-เพนทาโนน, 4-ไฮดรอกซิล 4-ไดเมทิล- และ 4-ไพเพอริไดโอน 2, 2, 6, 6-เตตระเมทิล- และในน้ำมันหนักพบ 2-เพนทาโนน 4, 4-ไฮดรอกซี และ ฟีนอล

จะเห็นได้ว่าชนิดของมวลชีวภาพ และ สภาวะในการไพโรไลซิสมีอิทธิพลต่อปริมาณ และ คุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Schwab, 1988)

Coulson and Bridgewater (2005) ได้ทำการศึกษาวิจัย การไพโรไลซิสแบบเร็วของพืช 2 ชนิด ได้แก่ ต้น *Arundo donax* (giant reed) และ ต้น *Cynara cardunculus* (cardoos) ทั้งสองจัดเป็นพืชที่เติบโตเร็วและให้ผลผลิตสูง กระจายตัวอยู่ทั่วไปตามเขตยุโรปตะวันตก จากผลการศึกษาทดลองโดยใช้ช่วงอุณหภูมิการไพโรไลซิส ระหว่าง 425 – 556 องศาเซลเซียส พบว่า ต้น giant reed มีปริมาณเถ้า (ash) ที่เป็นองค์ประกอบ อยู่ที่ 2.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 17.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ชาร์ มีอยู่ประมาณ 12.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของเหลวชีวภาพ 58.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แก๊ส 12.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน ต้น cardoon มีปริมาณเถ้า (ash) ที่เป็นองค์ประกอบ อยู่ที่ 5.67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 10.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ชาร์ มีอยู่ประมาณ 15.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของเหลวชีวภาพ 45.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แก๊ส 17.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Putun et al., (2004) ได้ศึกษาถึงภาวะการณ์ในการไพโรไลซิสฟางข้าว ที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อัตราความร้อน 5 เคลวินต่ออนาที อุณหภูมิที่ใช้ ขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของแก๊ส และความเร็วของกระแสไอน้ำ ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 673, 773, 823 และ 973 เคลวิน ที่อุณหภูมิ 823 เคลวิน ให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 27.26 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.425 – 0.85 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ 27.77 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 มิลลิเมตรต่ออนาที ความเร็วของไอน้ำอยู่ที่ 2.7 เซนติเมตรต่อวินาที

Ohra-aho et al, (2013) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง syringyl (S) และ guaiacyl (G) substructures ลิกนินที่มีการใช้มากขึ้นเป็นเกณฑ์ในการเลือกสายพันธุ์ยูคาเพื่อการผลิตเยื่อกระดาษจากกระบวนการกระจาย S / G จากหลายสายพันธุ์ยูคาลิปตัสในบราซิลได้ถูกกำหนดโดยการวิเคราะห์จากการไพโรไลซิสและแก๊สโครมาโตกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี [pyrolysis-GC/MS (Py-GC/MS)] และอัลคาไลด์ออกซิเดชัน nitrobenzene โดยตรงจากเส้นใยไม้ อัตราส่วน S / G คำนวณได้จากข้อสรุปขั้นต้นส่วนของ S และ G ประเภทลิกนินไพโรไลซิสผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอน 1-3 ตัว มีโครงสร้างโซ่ข้าง ซึ่งเทคนิค Py-GC/MS เปิดเผยให้เห็นการกระจายของลิกนินโครงสร้างโซ่ข้างที่แตกต่างกันระหว่างสายพันธุ์ที่มีแนวโน้มที่คล้ายกันทั้งใน G และ S Series ผลการตรวจสอบที่มีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก(PCA) ซึ่งยังเผยว่าโครงสร้างที่คล้ายกันด้านโซ่ใน G และหน่วย S มีความสัมพันธ์กับแต่ละอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลมา PCA ซึ่งความแตกต่างระหว่างสองวิธีที่อาจเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายกลไกที่มีลิกนินและวิธีการ Py-GC/MS ออกซิเดชัน nitrobenzene ขึ้นอยู่กับผลเหล่านี้เป็นไปได้ที่จะบอกว่าวิธีการมีความน่าเชื่อถืออย่างไรก็ตามวิธีการทั้งสองสามารถดีใช้เพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน S / G ลิกนินกลุ่มตัวอย่าง

จะเห็นได้ว่างานวิจัยด้านไพโรไลซิสชีวมวลมีความหลากหลายเป็นอย่างมาก ซึ่งในต่างประเทศได้ให้ความสำคัญกับงานวิจัยทางด้านดังกล่าวเป็นอย่างมาก รวมไปถึงงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทนอื่นๆ ที่จัดได้ว่ามีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของมนุษยชาติในอนาคต โดยในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่สามารถนำผลิตพลังงานจากชีวมวลขึ้นมากมาย โดยเฉพาะประเทศในแถบทวีปยุโรป ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยนั้นนับได้ว่าเป็นประเทศหนึ่งที่มีทรัพยากรชีวมวลจำนวนมาก ชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทย คือ ฟางข้าว และชานอ้อย ซึ่งถูกทิ้งไว้ในไร่หรือถูกเผาทิ้ง รวมไปถึงเศษวัชพืช จำพวกหญ้า หรือหญ้าคา ที่ปราศจากการนำมาใช้ประโยชน์ จากการประมาณการ พบว่า ประเทศไทยจะมีศักยภาพในด้านของชีวมวลมากกว่า 20 ล้านตัน น้ำมันดิบ ซึ่งมากกว่าครึ่งหนึ่งของการใช้

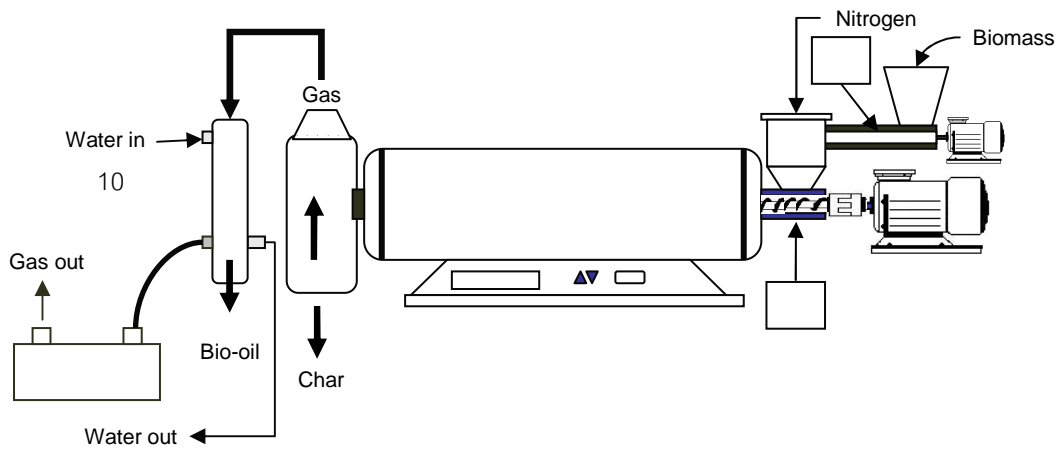
น้ำมันในปัจจุบัน ดังนั้นการนำชีวมวลมาแปรรูปเพื่อให้มีคุณค่าเพิ่มมากขึ้น หรือการใช้พลังงานจากชีวมวลนั้น นับว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

## 2.4 ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและคู่

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้มีพัฒนาและเปลี่ยนแปลงมาจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเดิมที่มีความแตกต่างกันในด้าน ปริมาณการป้อนสาร ระบบสกรู การทำปฏิกิริยาภายในเครื่องเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งแบบเดิมเป็นการสัมผัสความร้อนของชีวมวลกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์แบบใหม่จะเป็นแบบสัมผัสและถ่ายเทความร้อนของชีวมวลกับหินกรวดขนาดทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 - 10 มิลลิเมตร ระบบใหม่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กว่า และได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่มากกว่า รวมถึงมีคุณภาพมากกว่า อีกทั้งขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ของระบบใหม่จะมีขนาดใหญ่กว่า มีความซับซ้อนของระบบมากกว่า แต่ถูกพัฒนาด้านเทคนิคที่ค่อนข้างเรียบง่าย และให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพที่สูง ในการเปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์สามารถเรียกเครื่องปฏิกรณ์แบบเดิมว่า เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบสกรูเดี่ยว และ เครื่องปฏิกรณ์แบบใหม่ว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแบบสกรูคู่ ซึ่งมีลักษณะส่วนประกอบและโครงสร้าง ดังนี้



ภาพที่ 2.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูเดี่ยว

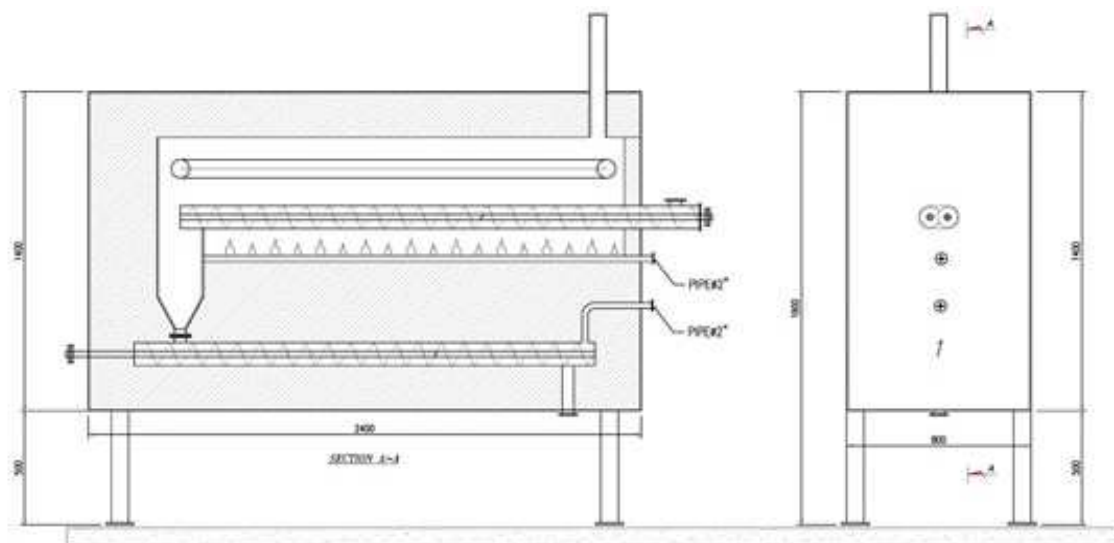


ภาพที่ 2.4 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูเดี่ยว



ภาพที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูคู่





ภาพที่ 2.6 โครงสร้างระบบสกรูคู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

## 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภท (Bridgwater et al., 2007) คือ 1) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาดีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน 2) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนฟทาดีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีดีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5$ - $C_6$  ประกอบเป็น

โครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่น เป็น 5 ส่วน (Alencar et al., 1983; Laird et al., 2009; Li et al., 2009) คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิลเบนซีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 – 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ โดเมทิล แนนทาลีน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนานทีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

และ 3) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้นโดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

สินีนากู (2547) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การไพโรไลซิสชีวมวล ซึ่งเป็นกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนที่มีประสิทธิภาพกระบวนการหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ แก๊สเชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์ของเหลว และซาร์ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสของชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไบบดแบบหมุนเวียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไรเซอร์ 2.5 เซนติเมตร สูง 165 เซนติเมตร ชีวมวลที่นำมาศึกษา คือ ชังข้าวโพด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับที่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิช่วง 650-850 องศาเซลเซียส ร้อยละของชังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมช่วง 0-100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ช่วง 1-5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาช่วง 5-9 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิร้อยละของชังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสม ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแก๊สมีเทนมีค่าลดลงอย่างมาก โดยภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของซังข้าวโพดในเชื้อเพลิงผสมเท่ากับ 100 ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่ากับ 5 และร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 9 โดยได้ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 52.0 และ 18.0 ตามลำดับ

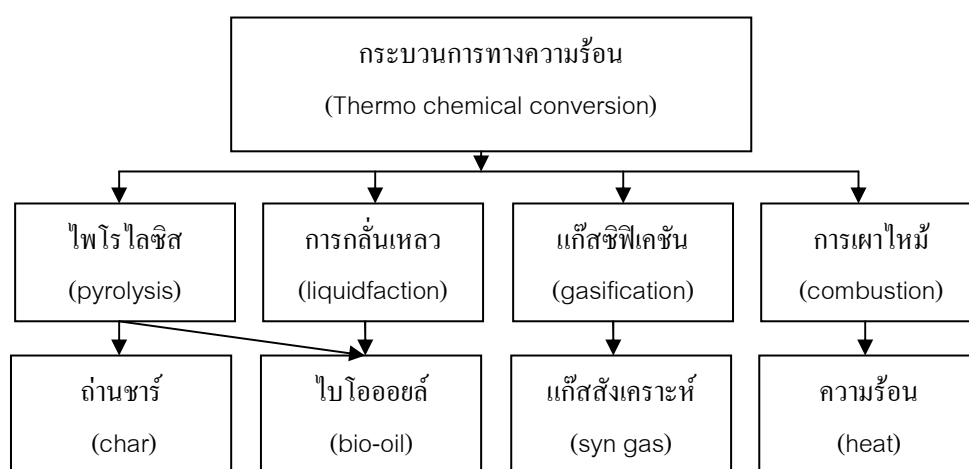
Asadullah et al., (2007) ศึกษาการไพโรไลซิสของกากชานอ้อยในระบบปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาที่อุณหภูมิต่างกันในช่วง 300 – 600 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพได้ได้จากสองส่วนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ได้ คือ 66 เปอร์เซ็นต์ แก๊สที่ไม่สามารถระเหยได้จะประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน โพรเพน และไพรีน ความหนาแน่น และความหนืดอยู่ที่ 1,130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 19.32 เซนติพอยต์ สำหรับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากส่วนหนึ่ง และ 1,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 4.25 เซนติพอยต์ สำหรับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากส่วนที่สอง ค่าความร้อนสูง อยู่ที่ 17.25 เมกกะจูล ต่อ กิโลกรัม pH 3.5 และ 19.91 เมกกะจูล ต่อ กิโลกรัม pH 4.5 ตามลำดับ

Lee et al., (2010) ทำการวิจัยเรื่อง การไพโรไลซิสหญ้าเนเปียร์ (Napier grass) ในเตาปฏิกรณ์แบบอินดักชันฮีตติ้ง (induction-heating) ในการวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลผลิตที่ได้ และ ลักษณะทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ และ ถ่านชาร์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลวมีอัตราเพิ่มขึ้นตามอัตราช่วงความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 150 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้แก๊สโครมาโตกราฟี แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) ในการวิเคราะห์ ซึ่ง พบว่า น้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดเล็กน้อย และมีสถานะเป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ ประกอบด้วยอินทรีย์สารที่เป็นองค์ประกอบรวมถึงกรดอะซิติก และมีองค์ประกอบของออกซิเจน และไนโตรเจน ประกอบอยู่ในรูป อย่างเช่น ฟีนอล พีรีดีน ไพราโซล อิมิดาโซล เอมีน และ คีโตน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารเหล่านี้ น่าจะเป็นเนื้อสารไบโอโพลีเมอร์ที่ได้จากหญ้าเนเปียร์ ในทางตรงข้าม ส่วนของสารประกอบที่ไม่ได้ถูกกลั่นออกมา ได้แก่ ส่วนประกอบแรกที่เป็น 3-methyl-1,2-butadiene, ฟูราน และ สารประกอบอะโรมาติกวงแหวนเดี่ยว เป็นต้น

## 2.6 หลักการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลที่เกี่ยวข้องกับไพโรไลซิส

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของพวกชีวมวลจะเห็นได้ว่า ชีวมวลสามารถที่จะแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งอาจเป็นกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมี ความร้อนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้

เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส, แก๊สซิฟิเคชัน, ลิกวิดแฟคชัน และการเผาไหม้ ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ดำเนินการและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แสดงดังภาพที่ 2.7 กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินการที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ทำให้กระบวนการทางเคมีโดยใช้ความร้อนน่าสนใจมากกว่าทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 กระบวนการแปรรูปทางความร้อน (thermo chemical conversion)

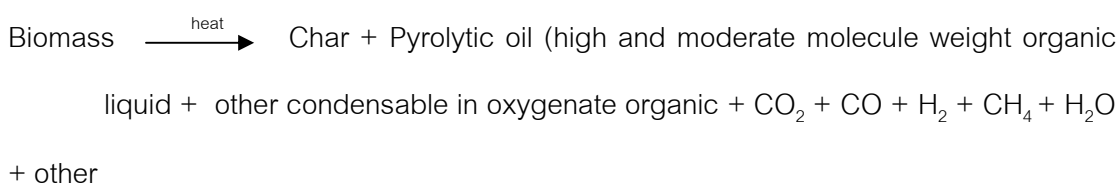
ลิกวิดแฟคชัน (liquefaction) เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (liquid fuel) ผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินทำได้โดยการแยกคาร์บอนออกหรือการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) เรียกกระบวนการนี้ว่า liquefaction เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากถ่านหินสามารถนำมาถลุงในกระบวนการกลั่นน้ำมัน จะได้น้ำมันสำหรับรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น พลาสติก และสารละลายต่างๆ (solvent) กระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง (direct liquefaction) เป็นการแปรรูปถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้กระบวนการเดียว (single process) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยทางอ้อม (indirect liquefaction) เป็นการนำถ่านหินมาผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สก่อน ในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวนี้นี้โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ เวลา อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมถึงอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วมีปริมาณมากขึ้น ภาวะที่ใช้ดำเนินการอยู่ที่ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 500 ถึง 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการ

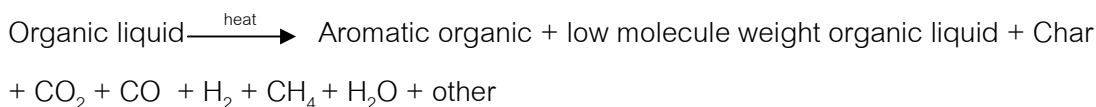
ส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะและต้องให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์

การเผาไหม้ (combustion) เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะที่ใช้ออกซิเจนโดยจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เข้าภาวะที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 800-1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการใช้อากาศเกินพอน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือ คาร์บอน (C)

แก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนชีวมวลไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนโดยวัตถุดิบจะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงโดยควบคุมปริมาณออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่เรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรงของเชื้อเพลิงเริ่มต้น มันสามารถเผาไหม้โดยตรงในภายในเครื่องยนต์หรือเปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้กระบวนการ Fischer-Tropsch แก๊สสามารถใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กระบวนการ Fischer-Tropsch จะเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe หรือ Co

กระบวนการไพโรไลซิสหรือคาร์บอนเนชัน (carbonization) เป็นการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) โดยไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยา(ไม่ใช้อุณหภูมิไฮโดรเจนหรือ คาร์บอนไดออกไซด์) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือของเหลว(ทาร์) ถ่านชาร์ และแก๊ส เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เพิ่มมากขึ้นได้แก่ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) การแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) ไฮโซเมอไรเซชัน (isomerization) ดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) คอนเดนเซชัน (condensation) ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆเช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชาร์ สารประกอบออร์แกนิก (organic compound)





โดยปริมาณการเกิดแก๊สและสารระเหยต่างๆจะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ โดยในช่วง 155-200 องศาเซลเซียสจะเป็นการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-280 องศาเซลเซียสเป็นการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วงอุณหภูมิ 280-380 จะเป็นช่วงเริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

## 2.7 ผลกระทบตัวแปรต่างๆ ต่อการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อ การไพโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้ (ชูศักดิ์, 2536)

### 2.7.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่าง ๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของโพลีแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และชาร์จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน

ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณชาร์ และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยตรง

### 2.7.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200–300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300–500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปล่อย

สารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง 500–800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่ก๊าซออกอีกเป็นครั้งที่สองพร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของชาร์วมไปถึง การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

การศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสไม้ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าเริ่มเกิดการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสการเกิดระเหยของสารระเหยต่างๆร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและ องค์ประกอบสารระเหยได้ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณถ่าน ชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สมากขึ้น (Maniatis, 1988)

นอกจากนี้การศึกษากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ได้แก๊สเพิ่มมากขึ้นคุณสมบัติ ของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อ ทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้นด้วย เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์จากปฏิกิริยา การแตกตัวขั้นที่สองเพิ่มมากขึ้น เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นจะลดลง ทำให้ปริมาณทาร์และชาร์ที่ ได้ลดลงและมีการสะสมของคาร์บอน โดยการแตกตัวของสารระเหยบนพื้นผิวถ่านชาร์ที่ร้อน โดย ปริมาณชาร์ไม่เกิดขึ้นมากในปฏิกิริยาขั้นต้น และแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (non-condensable gas) มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรกโดยไม่ผ่านถ่านชาร์ (Xianwen, 2000) นอกจากนี้สารระเหย ที่ได้ออกมามีปริมาณที่ไม่มากนัก และแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของ คาร์บอน หลังจากนั้นขั้นที่สองที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สซิฟิเคชัน ปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นโดยส่วนใหญ่ เป็นแก๊สไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปถ่านชาร์ต่อไป

### 2.7.3 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของ สารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่ม อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออก อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อย กว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิ มากกว่า 103–105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไป เป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ชาร์จำนวนน้อยมาก

การไฟโรไลซิสถ้าอัตราการให้ความเร็วเกินไปทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ถ่านชาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น (Zanzi, 1996) และโมเลกุลของน้ำมันที่ที่อยู่ในสภาวะแก๊สมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมาก ด้วยผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาในการสลายตัวของชาร์น้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันที่ จึงได้ชาร์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อนเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง (Tanaka et al, 1997)

นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไฟโรไลซิสในการเกิดถ่านชาร์ของชีวมวลมากกว่าถ่านหินเนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไฟโรไลซิสของเซลลูโลส โดยเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเซลลูโลสและเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความอยู่ตัวมากขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

#### 2.7.4 ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer) คือ ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวที่สูง (surface area) ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปเมื่อเกิดการสลายตัวขั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังขั้นที่สอง (secondary cracking) ได้รวดเร็วมากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น แต่โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคขนาดเล็กจะให้ผลมากกว่าจากอนุภาคขนาดใหญ่

#### 2.7.5 ความดัน

ความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ เนื่องจากเมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณลดน้อยลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำจะทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการแตกตัว (cracking) จะ



เกิดได้ดีที่ความดันสูง ทำให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลว น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

#### 2.7.6 สภาวะบรรยากาศ

ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาการไพโรไลซิสที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่าไฮโดรไพโรไลซิส (hydropyrolysis) สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้

#### 2.7.7 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปการสลายตัวก็เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยต่างๆ จะเกิดการแตกตัวขึ้นที่สองต่อไปอีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลง เนื่องจากสารระเหยมีปริมาณลดน้อยลงนั่นเอง

#### 2.7.8 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา

อัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลต่อปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีค่าสูงจะทำให้แก๊สตัวพาจัดสารระเหยต่างๆออกจากห้องเผาไหม้ได้เร็วขึ้นการเกิดปฏิกิริยาอาจไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ปริมาณที่เป็น ทาร์ลดน้อยลงและถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำเกินไปทำให้สารระเหยต่างๆอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นการแตกตัวขึ้นที่สองเกิดนานได้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ทาร์และถ่านชาร์ลดน้อยลง

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee et al., 2010 ทำการวิจัยเรื่อง การไฟโรไลซิสหญ้าเนเปียร์ (Napier grass) ในเตาปฏิกรณ์แบบอินดักชันฮีทติง (induction-heating) ในการวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลผลิตที่ได้ และ ลักษณะทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ และ ถ่านชาร์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลวมีอัตราเพิ่มขึ้นตามอัตราช่วงความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 150 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยใช้แก๊สโครมาโตกราฟี แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) ในการวิเคราะห์ ซึ่ง พบว่า น้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดเล็กน้อย และมีสถานะเป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ ประกอบด้วยอินทรีย์สารที่เป็นองค์ประกอบ รวมถึงกรดอะซิติก และมีองค์ประกอบของออกซิเจน และไนโตรเจน ประกอบอยู่ในรูป อย่างเช่น ฟีนอล ฟิวรีน ไพราโซล อิมิดาโซล เอมีน และ คีโตน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารเหล่านี้ น่าจะเป็นเนื้อสารไบโอโพลีเมอร์ที่ได้จากหญ้าเนเปียร์ ในทางตรงข้าม ส่วนของสารประกอบที่ไม่ได้ถูกกลั่นออกมา ได้แก่ ส่วนประกอบแรกที่เป็น 3-methyl-1,2-butadiene, พูราน และ สารประกอบอะโรมาติกวงแหวนเดี่ยว เป็นต้น

Zheng et al., 2008 ได้ทำการไฟโรไลซิสต้นฝ้ายแบบเร็วที่อุณหภูมิ 480 ถึง 530 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูไดซ์เบด ได้น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ผลการทดลองได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 55 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี แมสสเปกโตรเมทรี-แก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยน้ำ กรด และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก วิเคราะห์ค่าความร้อนอยู่ที่ 17.77 เมกกะจูล/กิโลกรัม ความคงตัว การละลายและการกักความร้อนมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้การเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หรือ เตาเผา หรือนำไปกลั่นแยกใช้ในยานพาหนะ นอกจากนี้ทำการปรับปรุงระบบในการไฟโรไลซิสโดยมีตัวป้อนสารสองชั้นเพื่อป้องกันการอุดตันทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Lu et al., 2008 ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากแกลบศึกษาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 550 องศาเซลเซียส โดยได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุด 50 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยวิธี อินดักทีฟ-คัพเปิลพลาสมา อะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรเมทรี วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าจะประกอบไปด้วยสารต่างๆมากกว่า 50 ชนิด เช่น กรด แอลกอฮอล์ คีโตน ฟีนอล เอสเทอร์ อัลดีไฮด์ พูราน และเมื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ความหนืด การคงสภาพ การหล่อลื่น การสึกหรอ จะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

Zheng et al., 2013 ได้ทำการเตรียมซังข้าวโพดเพื่อการทดลองโดยใช้การอบความร้อนด้วยเตาแบบหลอดยาวที่อุณหภูมิ (auger reactor) 250–300 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของปฏิกิริยา (residence times) 10–60 นาที หลังจากนั้นนำมาเข้าปฏิกิริยาแบบฟลูไดซ์เบดของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ให้ผลของน้ำมันชีวภาพที่สูง ค่าความร้อนและค่าพีเอช มีคุณภาพมากขึ้นเนื่องจากการเตรียมตัวอย่างซังข้าวโพดที่ดี การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared Spectroscopy (FTIR) และ quantitative solid  $^{13}\text{C}$  nuclear magnetic resonance spectrometry (NMR) พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพดมีลักษณะพันธะที่เกาะตัวกันได้ดี โดยมีรูปแบบในหลายๆ พันธะซึ่งแสดงผลที่ดีออกมา และเมื่อนำไปประกอบกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบ Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) พบว่า มีกรดอะซิติก และเฟอร์ฟูรอล เป็นส่วนประกอบในน้ำมันชีวภาพได้ลดลงเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และตามระยะเวลาของปฏิกิริยาที่ดำเนินไป จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการเตรียมตัวอย่างซังต้นสามารถช่วงปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้ พิจารณาจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างของน้ำมันชีวภาพ และปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่เพิ่มขึ้น

Putun et al., 2004 ศึกษาถึงภาวะการไพโรไลซิสของฟางข้าวที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อัตราความร้อน 5 เคลวิน/นาที อุณหภูมิที่ใช้ขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของกระแสไอน้ำ ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 673, 773, 823 และ 973 เคลวิน ที่อุณหภูมิ 823 เคลวินให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 27.26 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.425-0.85 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ 27.77 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 มิลลิลิตร/นาที ความเร็วของไอน้ำอยู่ที่ 2.7 เซนติเมตร/วินาที

Asadullah et al., 2007 ได้ศึกษาการไพโรไลซิสของกากชานอ้อยในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาที่อุณหภูมิต่างกันในช่วง 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพที่ได้เก็บที่คอนเดนเซอร์ สองส่วนที่อุณหภูมิต่างกัน ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ได้ 66 เปอร์เซ็นต์ แก๊สที่ไม่สามารถระเหยได้จะประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน โพรเพนและโพรพีน ความหนาแน่นและความหนืดอยู่ที่ 1130 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 19.32 เซนติพอยส์ สำหรับน้ำมันชีวภาพได้จากส่วนที่หนึ่งและ 1050 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 4.25 เซนติพอยส์ สำหรับน้ำมันชีวภาพได้จากส่วนที่สอง ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 17.25, pH 3.5 และ 19.91 เมกกะจูล/กิโลกรัม pH อยู่ที่ 4.5 ตามลำดับ

Lee et al., 2005 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา การปรับสภาพ และระบบการกำจัดถ่านชาร์ตต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ 410-510 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณโลหะอัลคาไลต่ำ โดยส่วนใหญ่จะติดออกมาจากการกำจัดถ่านชาร์ตและการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นจะเพิ่มการลดปริมาณโลหะอัลคาไล การปรับสภาพทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความบริสุทธิ์ ปลอดภัยและเพิ่มมูลค่าได้ง่าย น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น น้ำมันดีเซลหรือเชื้อเพลิงในการพัฒนา โดยสามารถใช้โดยตรงหรือผสมกับเชื้อเพลิงทางการค้า ข้อดีของการประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีกำมะถัน ผลิตภัณฑ์แก๊สหลักที่ได้ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนที่อุณหภูมิสูงปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและแก๊สอื่น ๆ รวมถึงค่าความร้อนจะสูงขึ้น และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ตที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยสามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานหรือใช้เป็นตัวดูดซับแก๊ส ได้แก่ แอมโมเนีย

Su-Hwa et al., 2008 ศึกษาการไพโรไลซิสของฟางข้าวและกากไม้ไผ่โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่ประกอบด้วยระบบแยกถ่านชาร์ต และศึกษาถึงอิทธิพลของปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของระบบการแยกถ่านชาร์ต ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพได้ทำการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 415-540 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว และช่วงอุณหภูมิ 350-510 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง, อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง และชนิดของก๊าซตัวพา ผลการวิจัยพบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ 440-500 องศาเซลเซียสสำหรับฟางข้าว และ 405-440 องศาเซลเซียสสำหรับกากไม้ไผ่ และจากผลการทดลองของกากไม้ไผ่ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ที่มากกว่า 70% ของน้ำหนักกากไม้ไผ่ ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารเชื้อเพลิง, อัตราการป้อนของสารเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อให้อัตราของสารป้อนเร็วและขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ได้ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพมากกว่า และการใช้ก๊าซผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซตัวพา จะทำให้ปริมาณการผลิตน้ำมันชีวภาพมีมากขึ้น องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพ ประกอบไปด้วย ฟีนอลิก (phenolics), เฟอริฟูรอล (furfura), กรดอะซิติก (acetic acid), เลโวกลูโคซาน (levoglucosan), กัวไอคอล (Guaiacol), อัลคิล กัวไอคอล (alkyl guaiacol), คีโตน (ketones) และอัลดีไฮด์ (aldehydes) นอกจากนี้การทดลองยังสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพคุณภาพสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะแอลคาไลน์ และแอลคาไลน์เอิร์ธต่ำ แสดงให้เห็นระบบแยกถ่านชาร์ตมีประสิทธิภาพดี

Sensoz et al., 2000 ได้ศึกษาไพโรไลซิสของเมล็ดดอกคำฝอยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งในส่วนของโครงสร้างของน้ำมันชีวภาพได้จากการไพโรไลซิส โดยนำเมล็ดดอกคำฝอยอัดเป็นแผ่นเค้กขนาด 1.8 มิลลิเมตร ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ความร้อน 10, 30, 50 องศาเซลเซียสต่อเวลาที่ที่บรรยากาศออกซิเจน และ 50 องศาเซลเซียสต่อเวลาที่ที่ภาวะแก๊สไนโตรเจน ได้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 36.84, 36.42, 36.84 และ 36.00 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนทำให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.50, 1.32, 1.55 สูงกว่าแก๊สไนโตรเจนที่มีค่าเท่ากับ 1.13 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา catalytic reforming ของแอลกอฮอล์และสารอะโรมาติกที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ให้เปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำน้ำมันชีวภาพมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคลิควิดโครมาโทกราฟี พบว่ามีส่วนที่เป็น asphaltenes ร้อยละ 50-62.5 และ n- Pentane soluble ร้อยละ 37.5-50.0 โดยน้ำหนัก ยังมีส่วนที่เป็นโพลีอินและเมทานอล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ของ O-H stretching ที่ช่วง 3200 และ 3400  $\text{cm}^{-1}$  C=O stretching ที่ช่วง 1700 และ 1750  $\text{cm}^{-1}$  ของหมู่คีโตนและหมู่อัลดีไฮด์ จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค  $^1\text{H}$  NMR พบ aromatic hydrogen resonance ในช่วง 6.5-9.0 พีพีเอ็ม และ aliphatic hydrogen resonance 0.5-6.5 พีพีเอ็ม จากการวิเคราะห์ทางเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบ  $\text{C}_{15}$ - $\text{C}_{36}$  ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1079 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความหนืดเท่ากับ 225 เซนติสโตกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และมีจุดวาบไฟ 58 องศาเซลเซียส

Xiao and Yang, 2013 ได้ทำการทดลองการไพโรไลซิสชีวมวลในปฏิกรณ์ทรงกระบอก (tubular reactor) ที่อุณหภูมิที่ต่างกัน และทำการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสารประกอบกึ่งชาร์โค้ก และทาร์ (organic structure of semi-char and tar) โดยใช้เทคนิค Fourier-transform infrared (FTIR) ในการวิเคราะห์สารประกอบดังกล่าว องค์ประกอบของทาร์ที่อุณหภูมิที่แตกต่างวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรสโกปี (GC/MS) การไพโรไลซิสชีวมวลในช่วงอุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงจะพบแก๊สเป็นส่วนใหญ่ ผลได้ของสารประกอบกึ่งชาร์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วย C=O, C=C, C-H, C-O และ OH มีค่าน้อยในช่วงแรก แต่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่วนผลได้ของทาร์มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ในทาร์มีความเสถียรมีค่าน้อยในช่วงแรก แต่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ เช่นกัน

### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและวิธีการทดลองที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูเดียว

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมหญ้าคาเพื่อใช้ในการทดลอง

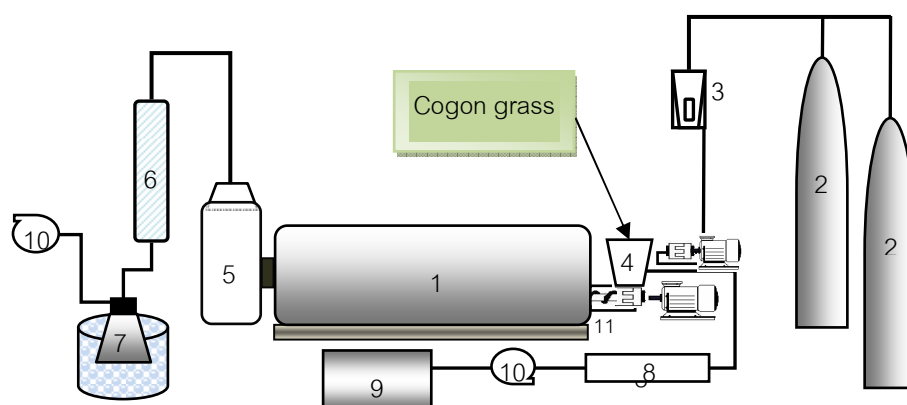
3.1.1.1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ

3.1.1.2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด

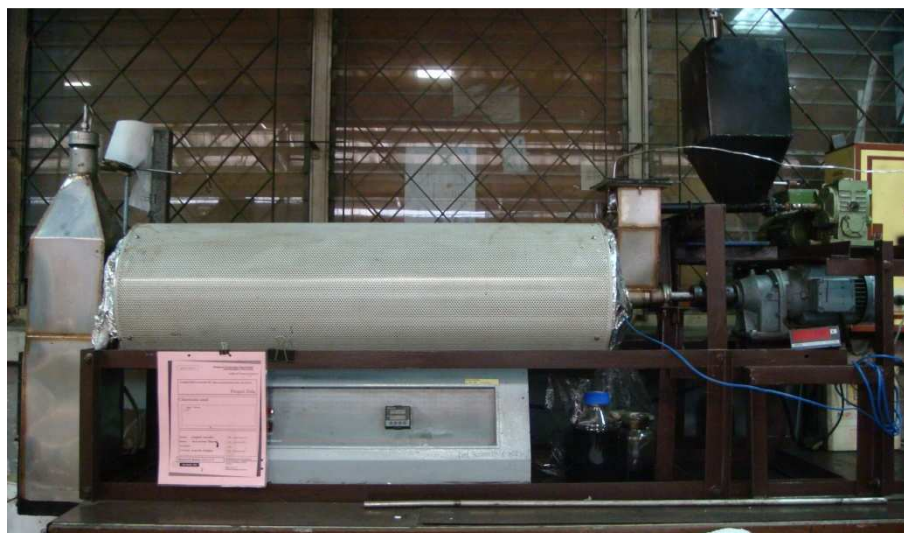
3.1.1.3. เตาอบ (oven)

3.1.1.4. เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อนขนาด 0.05 – 2 มิลลิเมตร

##### 3.1.2 ชุดการทดลองไพโรไลซิสเครื่องปฏิกรณ์สกรูเดียว



ภาพที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูเดียว (Schematic diagram of experiment setup): 1. เตาปฏิกรณ์ (tube furnace reactor) 2. ถังไนโตรเจน (nitrogen tank) 3. โรตاميเตอร์ (rotameter) 4. ถังป้อนชีวมวล (hopper) 5. เครื่องแยกสาร (separator) 6. เครื่องควบแน่น (condenser) 7. ขวดรูปชมพู่ (flask in ice bucket) 8. ชุดแผงไฟฟ้าควบคุม (electrical coil heater with temperature controller) 9. enclosed deionizer water tank 10. ปั๊ม (vacuum pump) 11. สกรู (screw feeder)



ภาพที่ 3.2 ชุดเครื่องปฏิบัติการไพโรไลซิสสกรูเดี่ยว

### 3.1.3 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.1.3.1 หน้ำาคาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.05 – 2 มิลลิเมตร

3.1.3.2 แก๊สไนโตรเจน 99.50% จากบริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.3.3 เตตระไฮโดรฟูราน (Tetra hydro furan, THF)

### 3.1.4 การเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวล

3.1.4.1 เตรียมหน้ำาคาบดละเอียดให้มีขนาด 1,000 ไมครอน - 1 มิลลิเมตร

3.1.4.2 อบหน้ำาคานาน 2 ชั่วโมงให้มีความชื้นน้อยกว่า 5 %

3.1.4.3 นำหน้ำาคาไปวิเคราะห์องค์ประกอบเนื้อเยื่อ (Tissue components)

3.1.4.3 วิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM D 3173-3175)

3.1.4.4 วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D 3176-89)

### 3.1.5 การดำเนินการทดลอง

3.1.5.1 เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศออกจากระบบเป็นเวลา 10-15 นาที

3.1.5.2 เปิดเตาเผาโดยศึกษาที่อุณหภูมิ 400 - 500 องศาเซลเซียส

3.1.5.3 ปรับความเร็วสกรูเพื่อทำการป้อนหน้ำาคาขนาดอนุภาค ประมาณ 0.05 – 2 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนสาร 1.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง

3.1.5.4 เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านตัวควบแน่นสาร

3.1.5.5 เก็บตัวอย่างน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์และแก๊สที่ได้

3.1.5.6 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง

- 3.1.5.7 ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมัน ได้แก่
- อุณหภูมิในช่วง 400 - 500 องศาเซลเซียส
  - ขนาดอนุภาคของหุ้บ้าคาประมาณ 0.05 – 2 มิลลิเมตร
  - อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาที่ 100 – 200 มิลลิลิตร/นาที

### 3.1.6 การวิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์

- 3.1.6.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตร-  
เมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)
- 3.1.6.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis: C, H, N, and O)
- 3.1.6.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value)
- 3.1.6.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer
- 3.1.6.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ASTM D 93
- 3.1.6.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)
- 3.1.6.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

### 3.1.7 การคำนวณร้อยละผลได้จากทดลอง

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว (\% Liquid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_{Liq}}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\% Solid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_R}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (\% Gas yield)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว} \\ - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย  $W_{ini}$  = น้ำหนักรวมของหุ้บ้าคาเริ่มต้น

$W_R$  = น้ำหนักกากของแข็งที่ได้

$W_{Liq}$  = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว



### 3.2 เครื่องมือและวิธีการทดลองที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูคู่

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.2.1.1 เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ

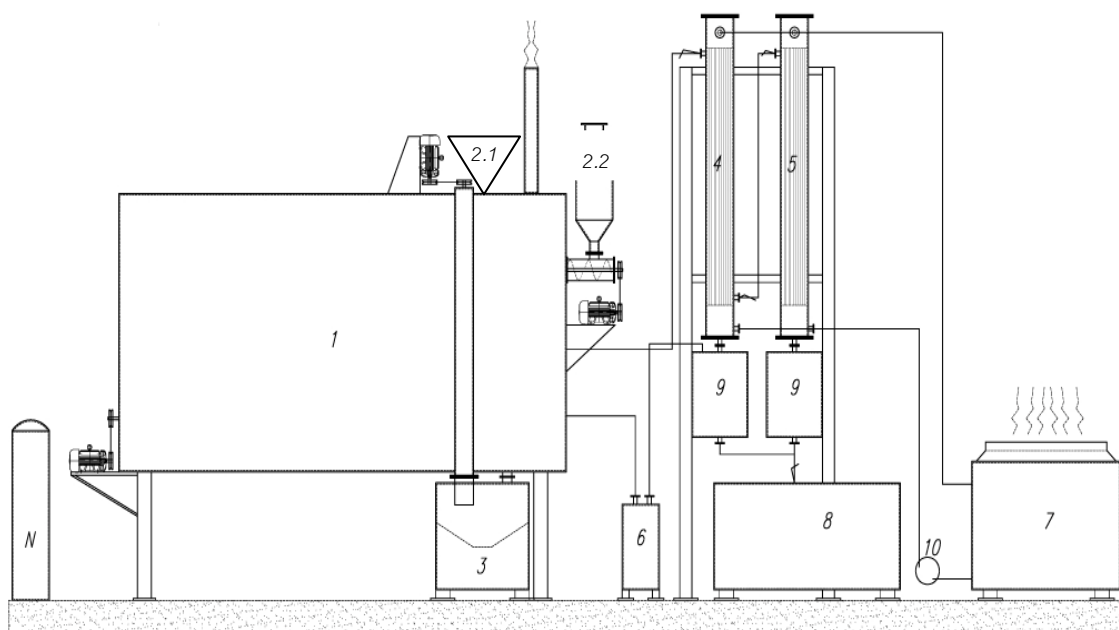
3.2.1.2 เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด

3.2.1.3 เตาอบ (oven)

3.2.1.4 เครื่องคัดขนาดอนุภาคของหุ้บ้าคาประมาณ 0.05 – 2 มิลลิเมตร

3.2.1.5 หินกรวดกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 5 มิลลิเมตร

#### 3.2.2 ชุดการทดลองไพโรไลซิสเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสปฏิกรณ์คู่



ภาพที่ 3.3 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสกรูคู่ ซึ่งมีส่วนประกอบตามหมายเลข ดังนี้  
 หมายเลข; 1) เตากำเนิดปฏิกรณ์ 2) ถังป้อน; 2.1) ถังป้อนชีวมวล 2.1) ถังป้อนหินกรวดกลม  
 3) ถังเก็บถ่าน และป้อนหินกรวดกลม 4) และ 5) คอนเดนเซอร์ 6) ถังพักก๊าซ 7) คูลลิ่งทาว-  
 เวอร์ 8) ถังเก็บน้ำมัน 9) ถังพักน้ำมัน และ 10) ตัวปั๊ม



ภาพที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟไฮดรอลิกสกัด

### 3.2.3 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.3.1 หน้ำาคาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคของหน้ำาคาประมาณ 0.05 – 2 มิลลิเมตร

3.2.3.2 แก๊สหุงต้มจากบริษัท ป.ต.ท. จำกัด ประเทศไทย ขนาดน้ำหนัก 84 กิโลกรัม

3.2.3.3 เตตระไฮโดรฟูราน (Tetra Hydro Furan, THF)

### 3.2.4 การเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวล

3.2.4.1 เตรียมหน้ำาคาบดละเอียดมีขนาด 1,000 ไมครอน - 1 มิลลิเมตร

3.2.4.2 อบหน้ำาคานาน 2 ชั่วโมงให้มีความชื้นน้อยกว่า 5 %

3.2.4.3 นำหน้ำาคาไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อเยื่อ (Tissue components)

3.2.4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM - D 3173-3175)

3.2.4.5 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM - D 3176-89)

### 3.2.5 การดำเนินการทดลอง

- 3.2.5.1 เตินระบบ และควบคุมอุณหภูมิด้วยหัวเผาให้ได้ความร้อนที่ 400 - 500 องศาเซลเซียส
- 3.2.5.2 กำหนดอัตราเร็วสกรูในการป้อนชีวมวล ที่อัตราการป้อนสาร 2 - 5 กิโลกรัม/ชั่วโมง
- 3.2.5.3 เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านตัวควบแน่นสาร
- 3.2.5.4 เก็บตัวอย่างน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์และแก๊สที่ได้
- 3.2.5.5 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง
- 3.2.5.6 ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมัน ได้แก่
- ขนาดอนุภาคของหญ้าคาประมาณ 0.05 – 2 มิลลิเมตร
  - อุณหภูมิในช่วง 400 - 500 องศาเซลเซียส

### 3.2.6 วิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์

- 3.2.6.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตร - เมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)
- 3.2.6.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis: C, H, N, S, and O)
- 3.2.6.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value)
- 3.2.6.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer
- 3.2.6.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ASTM D 93
- 3.2.6.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)
- 3.2.6.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

### 3.2.7 การคำนวณร้อยละผลได้จากทดลอง

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว (\% Liquid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_{Liq}}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\% Solid yield)} = 100 \times \left[ \frac{W_R}{W_{ini}} \right]$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (\% Gas yield)} = 100 - \left( \frac{\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว} + \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}}{\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด}} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } W_{\text{ini}} &= \text{น้ำหนักรวมของผักตบชวาเริ่มต้น} \\ W_{\text{R}} &= \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ได้} \\ W_{\text{Liq}} &= \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว} \end{aligned}$$

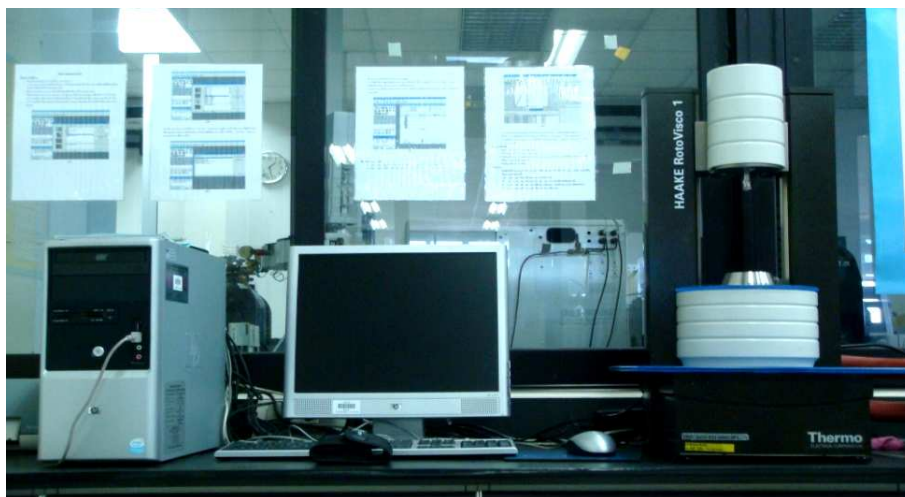
### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

3.3.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph with Mass Spectrometer), GC-MS เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ The Agilent 7000B Quadrupole GC/MS เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี จำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ของน้ำมันชีวภาพ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เป็นของเหลว แสดงดังรูปที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph with Mass Spectrometer, GC-MS)

3.3.2 เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) เป็นเครื่องที่ใช้วัดสถานะความหนืดของน้ำมันชีวภาพได้จากการไพโรไลซิส



ภาพที่ 3.6 เครื่อง Rheometer (ยี่ห้อ Haake Roto visco1)

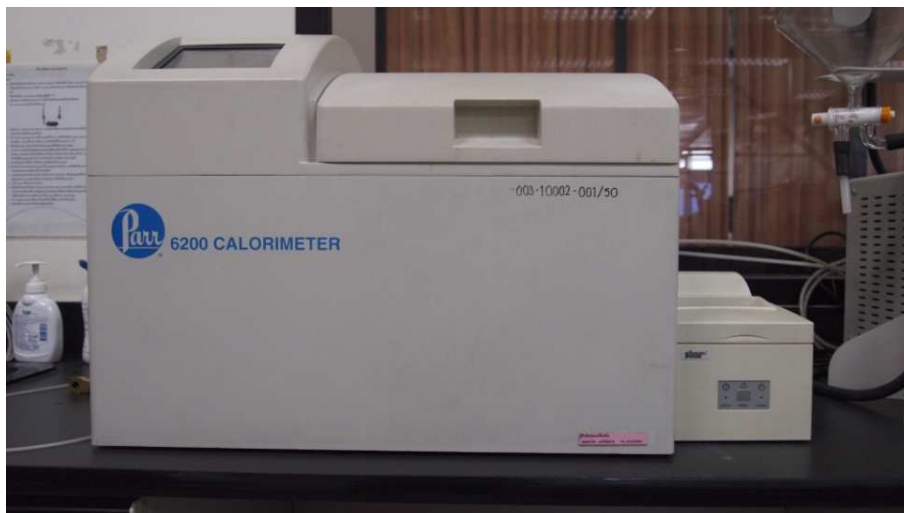
### 3.3.3 เครื่อง CHN2000

เป็นเครื่องการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในหญาคา และในน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน (C, H, N, O) ถูกเรียกว่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ



ภาพที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000

### 3.3.4 เครื่อง Parr 6200 Calorimeter ใช้ในการหาค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ



ภาพที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์ความร้อน(Calorimeter) รุ่น Parr 6200 Calorimeter

### 3.3.5 แผ่นเทียบสีการกัดกร่อน ตามมาตรฐาน



ภาพที่ 3.9 แผ่นเทียบสีการกัดกร่อน ตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของหญ้าคา

การวิจัยครั้งนี้ได้มีการเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ คือ หญ้าคา เพื่อทำการป้อนสู่ปฏิกิริยาเคมีเดี่ยว และสกรูคู่ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลได้ของน้ำมัน รวมถึงสมบัติทางเคมี และกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสดังกล่าว เริ่มจากการตัดหญ้าคา ทำการบดหยาบ และทำการตากและอบ จากนั้นบดละเอียด แล้วทำการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเนื้อเยื่อหญ้าคา การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุของหญ้าคา ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 หญ้าคา เตรียมตัวอย่างได้จากลำต้นและใบ สู่ขั้นตอนการบดหยาบ และบดละเอียด

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเนื้อเยื่อของหญ้าคา

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเนื้อเยื่อของหญ้าคา พบว่า ไฮโดรเซลลูโลส มีค่าสูงสุดที่ 63.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ ลิกนิน มีค่าเท่ากับ 43.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ส่วนประกอบอื่นได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และ แอลฟาเซลลูโลส มีอยู่ 32.42 และ 30.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากงานวิจัยของ Demirbas (2009) พบว่า เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของไม้ ที่มีอยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเซลลูโลสได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส ในสุญญากาศ จะให้ลิวอกูโคแซน (1,6-anhydroglucopyranose) ประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเซลลูโลสจัดว่าเป็นส่วนประกอบหลักของเนื้อเยื่อชีวมวล ดังนั้นค่าไฮโดรเซลลูโลสของหญ้าคาที่ได้จากการวิเคราะห์ถือว่ามีค่าค่อนข้างสูง

**ตารางที่ 4.1** องค์ประกอบเนื้อเยื่อของหญ้าคา

องค์ประกอบของเนื้อเยื่อ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%)
Holocellulose	59.38
- Alfa-Cellulose	27.96
- Hemicellulose	31.42
Lignin	39.45

#### 4.1.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของหญ้าคา

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบต่างๆ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยรวม และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของหญ้าคาที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งพบว่า องค์ประกอบโดยรวมของหญ้าคา ประกอบไปด้วย สารระเหยสูงร้อยละ 64.3 ความชื้นร้อยละ 5.3 คาร์บอนคงตัว 20.1 และเถ้าร้อยละ 10.3 จะเห็นได้ว่า หญ้าคามีปริมาณส่วนประกอบของสารระเหย และ คาร์บอนคงตัวที่สูง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลอง การแปรรูปหญ้าคาให้น้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ทั้งแบบสกรูเดี่ยว และสกรูคู่ ประกอบกับ มีปริมาณของเถ้า และความชื้นค่อนข้างต่ำ

**ตารางที่ 4.2** การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุของหญ้าคา

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%)	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%)
Moisture	5.3	C	41.9
Ash	10.3	H	6.2
Volatiles	64.3	N	1.6
Fixed carbon	20.1	O	39.8
		S	0.19

จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าหญ้าคาประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 41.90 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.2 ไนโตรเจน 1.6 และ กำมะถันร้อยละ 0.19 และออกซิเจนร้อยละ 39.8 ซึ่งให้ผลที่ดี เนื่องจาก ความต้องการคาร์บอนสูง และออกซิเจนต่ำ ถ้าเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ได้แก่ 1) การไพโรไลซิสผักตบชวา (สุพจน์, 2552) พบค่าคาร์บอนร้อยละ 29.70 ไฮโดรเจนร้อยละ 4.52 ไนโตรเจน 0.97 และ กำมะถันร้อยละ 0.21 และออกซิเจนร้อยละ 64.60 พบว่ามีค่าคาร์บอนต่ำ และออกซิเจนสูง 2) การไพโรไลซิสหญ้าสวิส (Mullen and Boateng, 2008) พบค่า



คาร์บอนร้อยละ 47.53 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.81 และออกซิเจนร้อยละ 42.54 ซึ่งพบว่ามีค่าคาร์บอนสูงเช่นเดียวกับหญ้าคา แต่มีค่าออกซิเจนที่สูงกว่าหญ้าคา

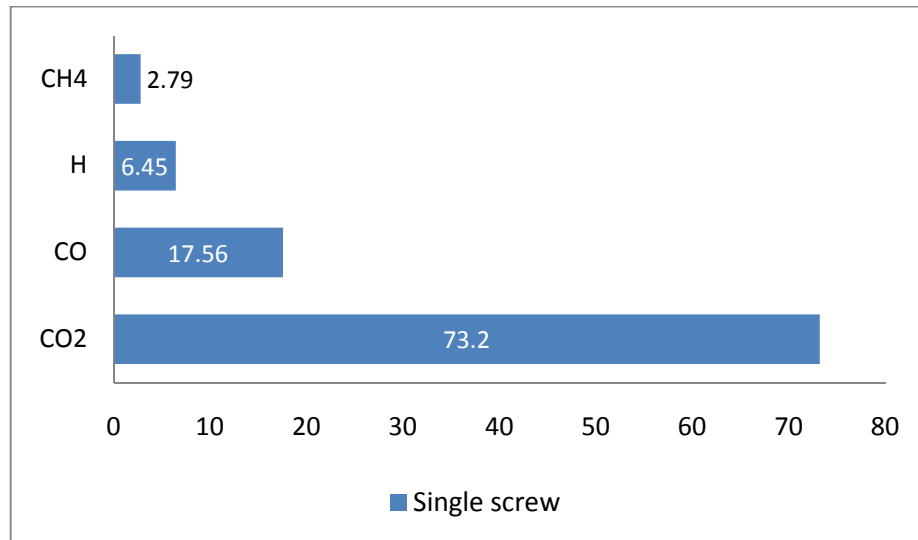
#### 4.2 ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์กรูเดียว



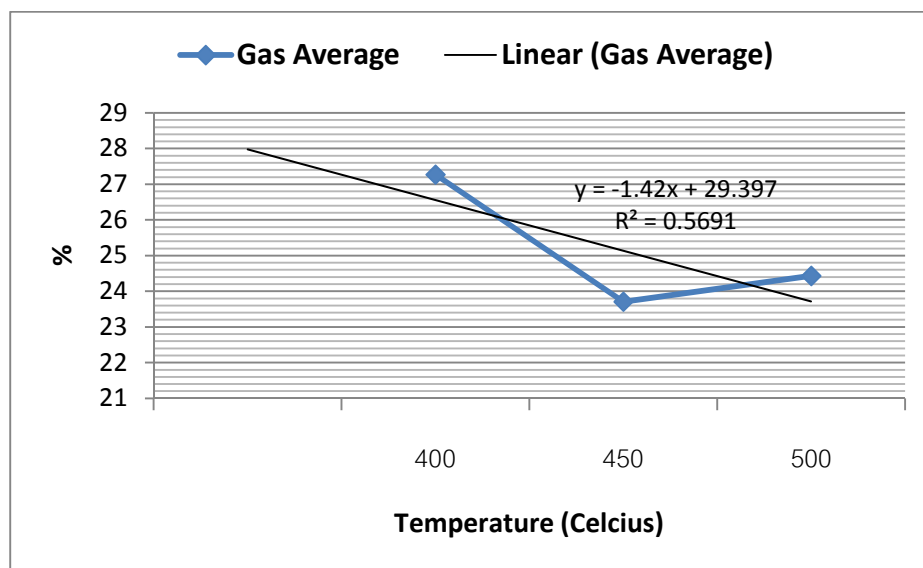
ภาพที่ 4.2 ผลิตภัณฑ์ (น้ำมันชีวภาพ สารละลาย และแขวนลอยจำพวก น้ำ และกรดอะซิติก และถ่านชาร์) ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว

##### 4.2.1 การกำหนดตัวแปรด้านอุณหภูมิเพื่อศึกษาผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดียว

จากการคำนวณผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดียว พบว่า ปริมาณผลได้ที่เป็นแก๊สมีปริมาณที่สูง โดยมีค่า 27.27, 23.71 และ 24.43 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบของเตาในการถ่ายโอนความร้อนบริเวณผนังเตามีความร้อนสูง และคงตัว จึงอาจมีผลต่อการทำให้เกิดการกลายเป็นไอแก๊สได้สูง เมื่อชีวมวลที่เป็นหญ้าคาที่มีความละเอียดสัมผัสกับความร้อนดังกล่าว แก๊สที่วิเคราะห์ได้ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (73.20 เปอร์เซ็นต์) คาร์บอนมอนอกไซด์ (17.56 เปอร์เซ็นต์) ไฮโดรเจน (6.45 เปอร์เซ็นต์) และมีเทน (2.79 เปอร์เซ็นต์) (ภาพที่ 4.3).



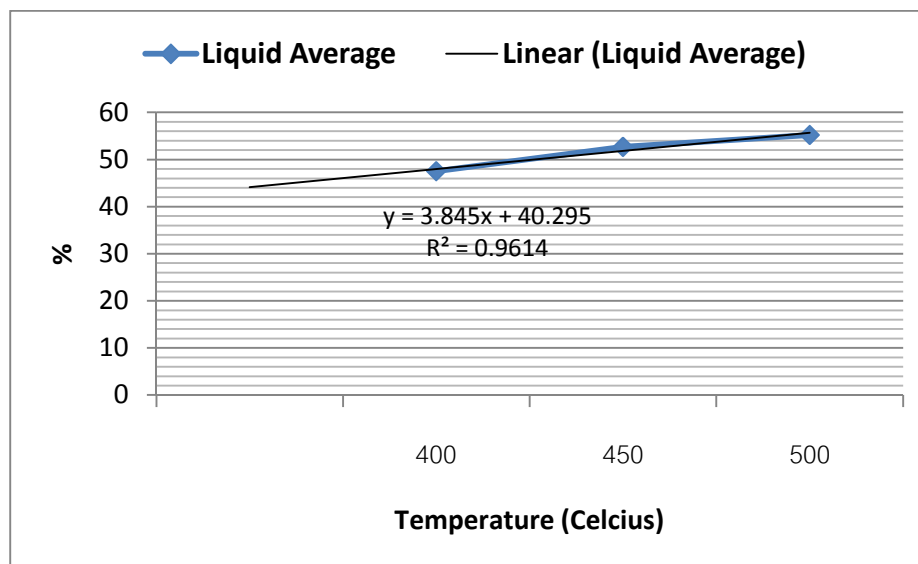
ภาพที่ 4.3 ปริมาณแก๊สชนิดต่างๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่



ภาพที่ 4.4 ผลได้เฉลี่ยของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

ในส่วนสถานะของเหลวนั้น พบว่า ค่าผลได้สูงสุดอยู่ที่ 55.23 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยเมื่อทำการแยกส่วนประกอบของสถานะของเหลว พบว่า ประกอบด้วยปริมาณของ น้ำมันชีวภาพ 33.76 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือคือ น้ำ กรดอะซิติก สารละลาย และสารแขวนลอย ชนิดต่างๆ และที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีผลได้อยู่ที่ 47.54 และ 52.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 4.5) โดยประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 28.75 เปอร์เซ็นต์ และ 30.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จะเห็นได้ว่า น้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ได้ค่าน้ำมัน

สูงสุดที่ 33.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ถึง ดี เพราะปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ อยู่ในช่วง 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ (Bilgen et al., 2012; Ioannidou, 2012; Ying et al., 2012; Gan and Yuan, 2013)

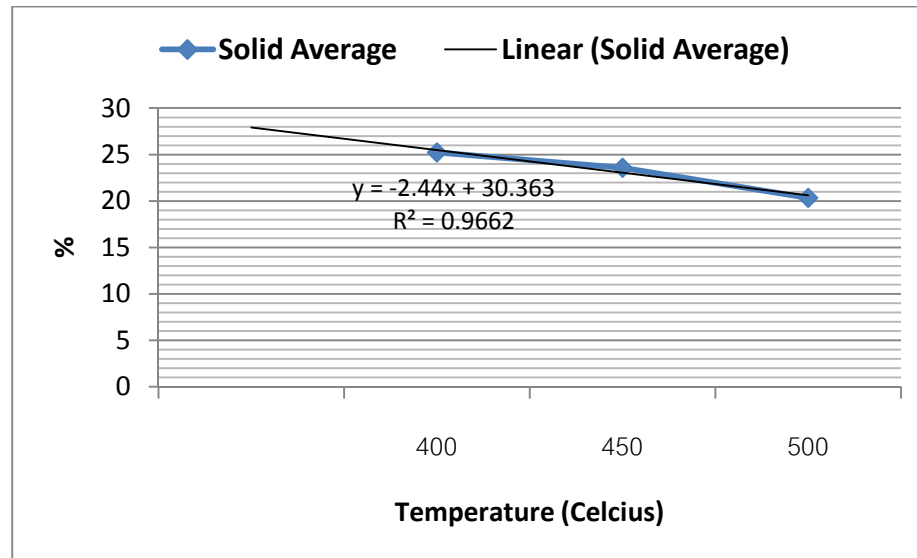


ภาพที่ 4.5 ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเบาเมื่อทำการแยกออกจากของเหลวทั้งหมด

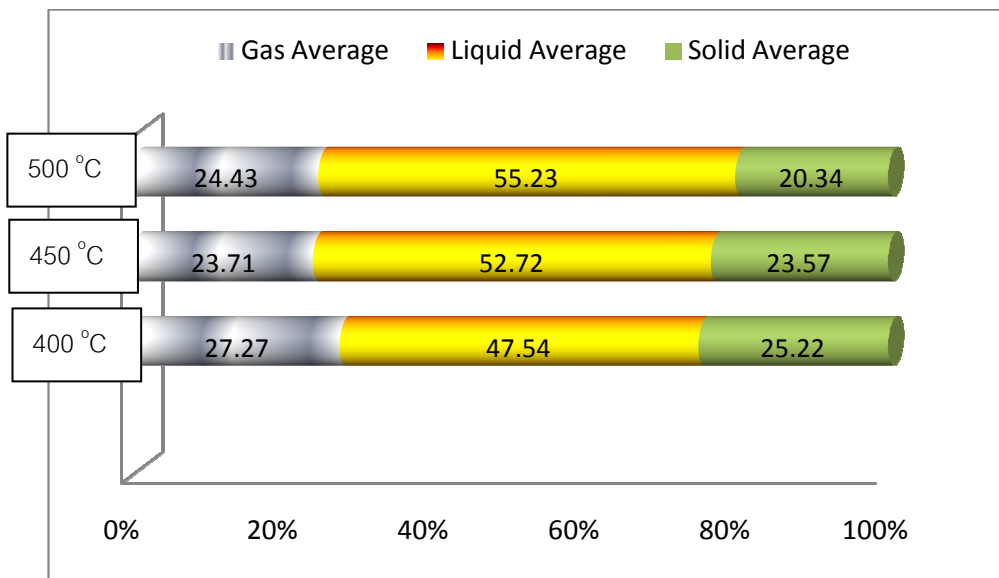
อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ (wt.%)		
	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเบา	ของเหลวทั้งหมด
400	28.75	18.79	47.54
450	30.25	22.47	52.72
500	33.76	21.47	55.23

ในส่วนของถ่านชาร์ ซึ่งเป็นผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง พบว่า มีผลได้อยู่ที่ 25.22, 23.57 และ 20.34 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพที่ 4.6) ซึ่งจัดได้ว่ามีปริมาณที่ต่ำ เนื่องมาจากการไพโรไลซิสชีวมวลที่ค่อนข้างคงที่ ได้ส่วนที่มีสถานะของเหลวที่มากกว่า บางส่วนสูญเสียไปในรูปของแก๊ส ดังนั้น ส่วนของของแข็งหรือถ่านชาร์ จึงเกิดการสลายไปเรื่อยๆ และเหลือตกค้างอยู่น้อย



ภาพที่ 4.6 ผลได้เฉลี่ยของถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว

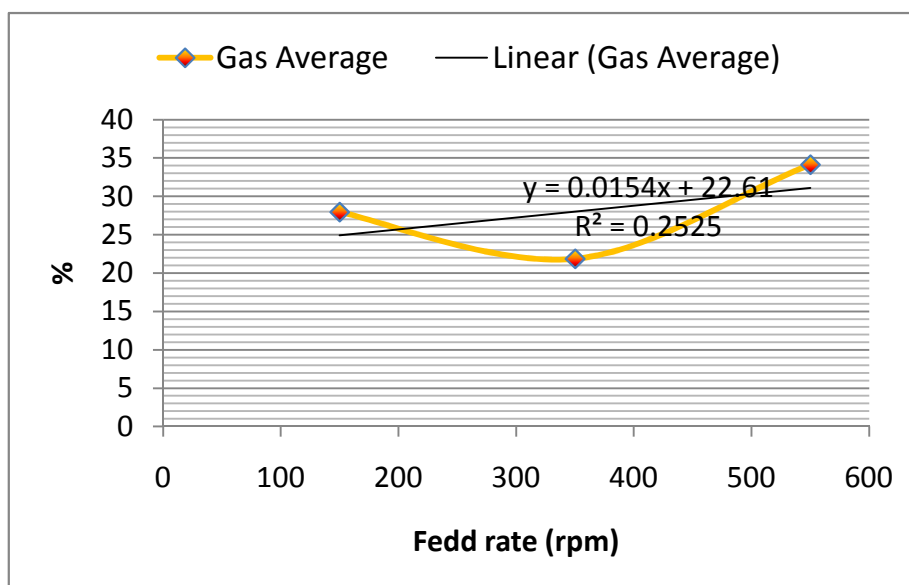
จากผลการวิจัยด้านผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาจากปฏิกรณ์สกรูเดียวด้วยตัวแปรด้านอุณหภูมิ สามารถสรุปได้ว่า สถานะที่เป็นของเหลวได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับสถานะที่เป็นแก๊สและของแข็งที่มีค่าผลได้ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าที่สูงขึ้น (ภาพที่ 4.7)



ภาพที่ 4.7 สัดส่วนของผลได้เฉลี่ยของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว ด้วยตัวแปรด้านอุณหภูมิ

#### 4.2.2 การกำหนดตัวแปรรอบสกรูเพื่อศึกษาผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

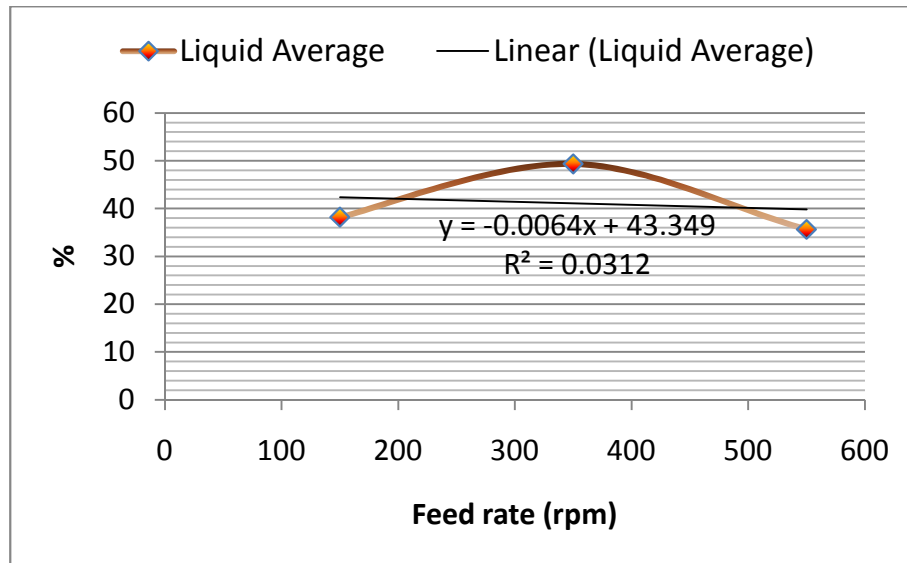
ผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ แก๊ส ของเหลว ของแข็ง ด้วยการกำหนดตัวแปรด้านรอบของสกรู มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (revolutions per minute;  $r\cdot\text{min}^{-1}$ ) ได้ทำการกำหนดรอบของสกรูที่ 150, 350 และ 550 รอบต่อนาที พบว่า ผลได้ของสถานะแก๊สมีค่า 27.98, 21.88 และ 34.14 เปอร์เซ็นต์ ที่ 150, 350 และ 550 รอบต่อนาที ตามลำดับ (ภาพที่ 4.8).



ภาพที่ 4.8 ผลได้เฉลี่ยของแก๊สจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว

ผลได้ของสถานะของเหลวมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 49.37 เปอร์เซ็นต์ ที่ 350 รอบต่อนาที โดยมีปริมาณของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 31.68 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วสกรู 150 และ 550 รอบต่อนาที พบผลได้ของสถานะของเหลวอยู่ที่ 38.25 และ 41.38 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 22.24 และ 26.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ซึ่งผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ 350 รอบต่อนาที ให้ผลได้ที่สูงเนื่องจากรอบของสกรูมีความเหมาะสมต่อการสลายชีวมวลภายใต้สภาวะของสกรูเดี่ยวต่อผนังปฏิกรณ์อย่างสมบูรณ์กว่ารอบสกรูที่ความเร็วอื่นๆ และ ผลได้ของสถานะของแข็ง หรือ ถ่านชาร์ มีค่า 33.77, 28.75 และ 24.48 เปอร์เซ็นต์ ที่ 150, 350 และ 550 รอบต่อนาที ตามลำดับ (ภาพที่ 4.9).

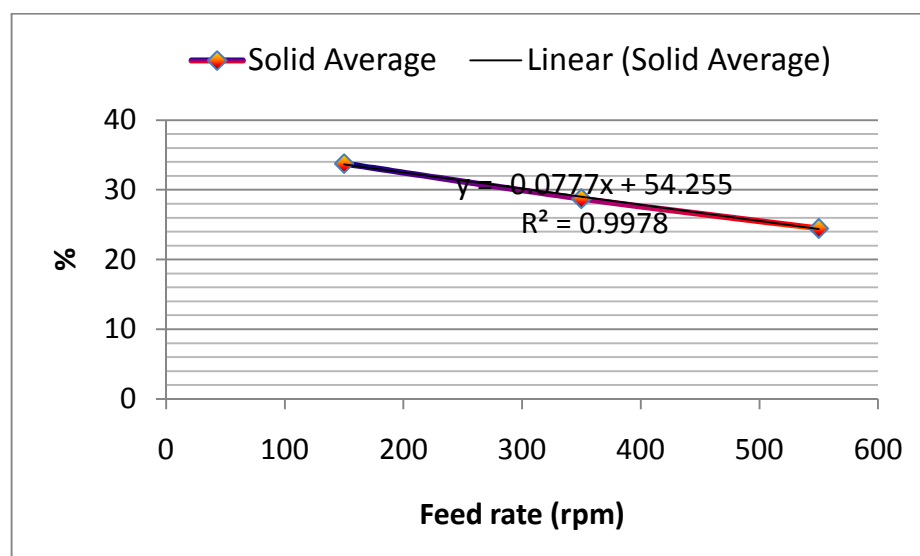
ผลได้ของสถานะของแข็ง หรือ ถ่านชาร์ พบว่า มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น จาก 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้ของของแข็งลดลงจาก 34 ถึง 24 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4.10).



ภาพที่ 4.9 ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว

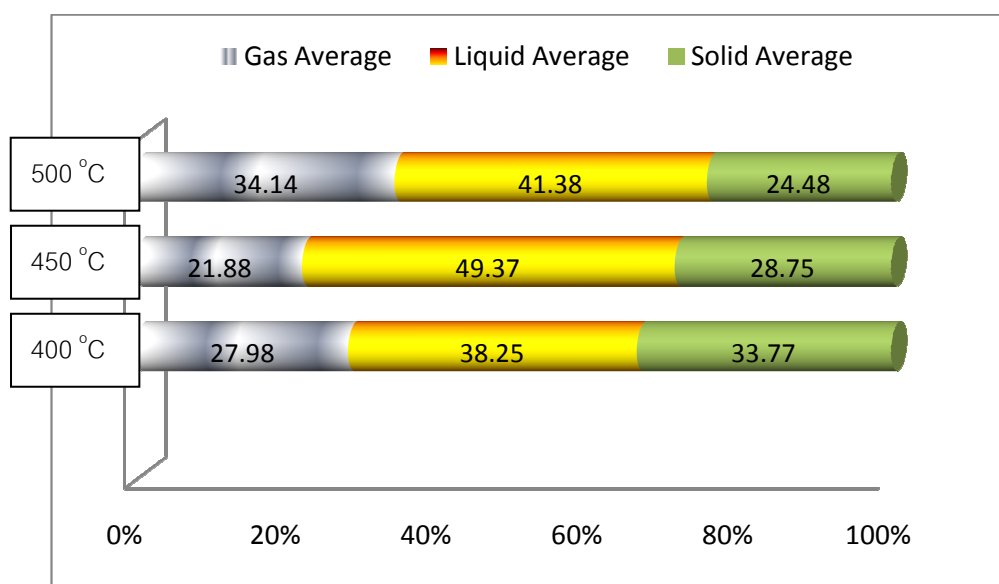
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเบาเมื่อทำการแยกออกจากของเหลวทั้งหมด

รอบสกรู (rpm)	ปริมาณ (wt.%)		
	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเบา	ของเหลวทั้งหมด
150	21.25	17.00	38.25
350	35.68	13.69	49.37
550	24.37	17.01	41.38



ภาพที่ 4.10 ผลได้เฉลี่ยของถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว

จากผลการวิจัยด้านผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว โดยใช้รอบของสกรูเป็นตัวแปรสามารถสรุปได้ว่า สถานะที่เป็นของเหลวมีค่าผลได้ที่ให้ผลดีที่รอบการหมุนของสกรูสูงสุดอยู่ที่ 350 รอบต่อนาที ซึ่งตรงข้ามกับสถานะที่เป็นแก๊สที่มีค่าผลได้ที่ลดลงเมื่อรอบของสกรูอยู่ที่ 350 รอบต่อนาที ส่วนสถานะที่เป็นของแข็ง มีค่าผลได้ที่ลดลงตามรอบสกรูที่เพิ่มขึ้นจาก 150, 350 และ 550 รอบต่อนาที ตามลำดับ (ภาพที่ 4.11)



ภาพที่ 4.11 สัดส่วนของผลได้เฉลี่ยของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว ด้วยตัวแปรรอบสกรู

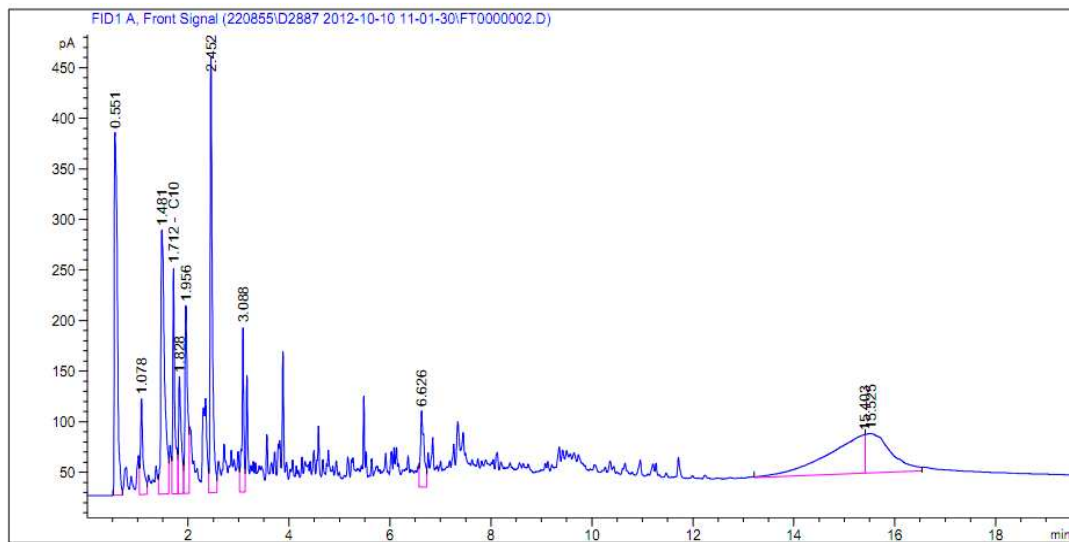
#### 4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

##### 4.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)

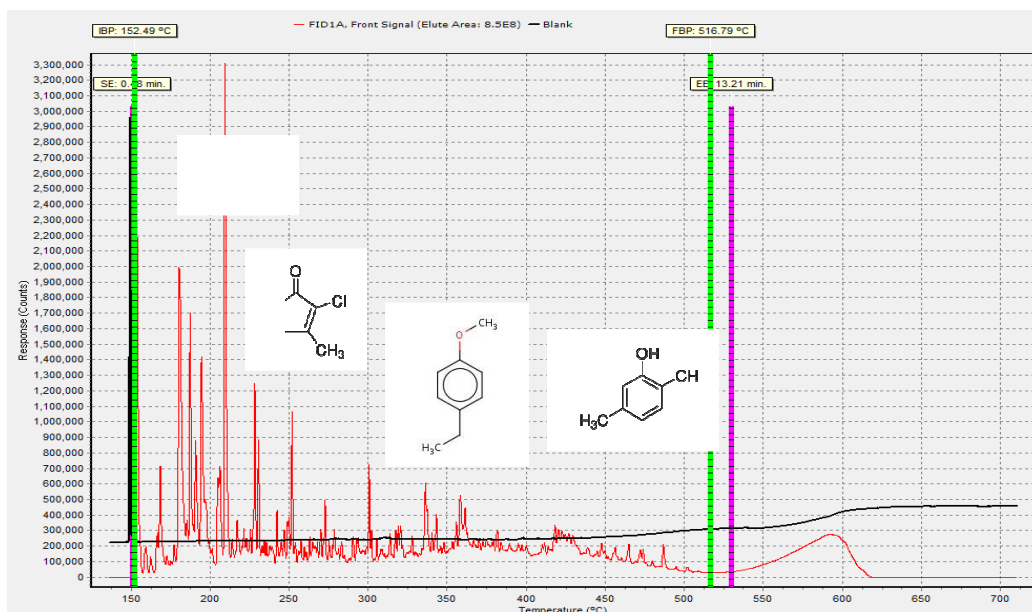
แมสสเปกโตรเมตรี เป็นการนำพลังงานเพื่อทำให้สารแตกตัวเป็นไอออนแล้วศึกษาค่ามวลต่อประจุ หรือ  $m/z$  (mass/charge) ของไอออนที่เกิดจากการแตกหักของสูตรโครงสร้าง ดังนั้นถ้าทราบสูตรโครงสร้างของไอออนก็จะทราบสูตรโครงสร้างของสาร (เย็นหทัย, 2549) แมสสเปกโตรเมตรีต้องทำควบคู่กับ แก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อเป็นการยืนยันการพบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ชัดเจนและแม่นยำ (Tessarolo et al., 2013; Xiao and Yang, 2013; Zheng et al., 2013)

จากกราฟในภาพที่ 4.12 เมื่อนำน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสหญ้าคาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมาเป็นตัวอย่าง (sample) ในการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างและโมเลกุลด้วย

GC และ GC-MS ซึ่งพบว่า พีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณของสารประกอบมากหรือน้อยดูจากพื้นที่ใต้พีค (area %) ซึ่งพบว่า ลำดับของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบตามปริมาณมีดังนี้ 1)  $C_{40}$  ขึ้นไป มีค่า 19.024%, 2)  $C_5 - C_6$  มีค่า 14.527%, 3)  $C_9 - C_{10}$  มีค่า 13.148%, 4)  $C_{11} - C_{12}$  มีค่า 12.658%



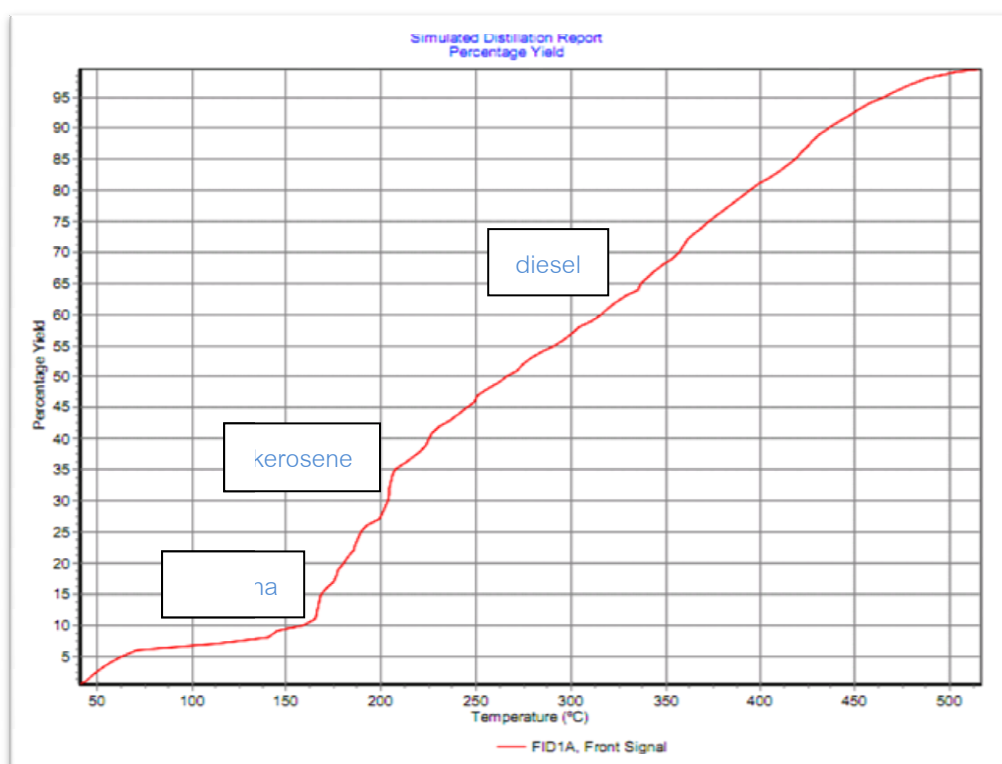
ภาพที่ 4.12 โครมาโทแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว



ภาพที่ 4.13 โครมาโทแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวเปรียบเทียบกับ Blank (เส้นสีดำ) และช่วงเวลาปฏิบัติการ (operate) ณ ช่วงเวลา และอุณหภูมิ จากเส้นลายสีชมพูและเขียว ตามลำดับ



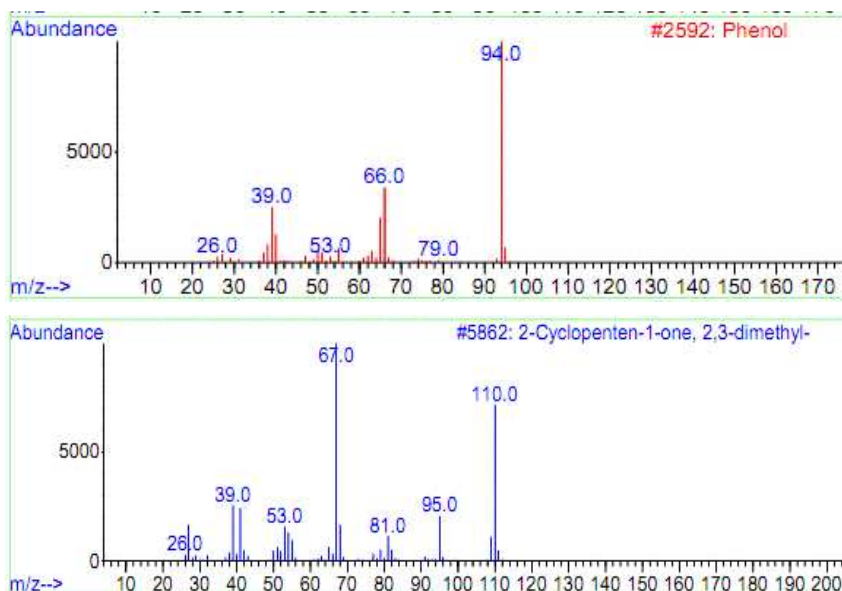
ดังนั้น จะเห็นได้ว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีปริมาณของดีเซล แครโซีน และเนฟทา ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีโมเลกุลของคาร์บอนอยู่ที่ 5 – 22 นั่นคือ  $C_5 - C_{22}$  ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีนั้นใช้เวลาปฏิบัติการ (retention time) ในช่วง 0.46 – 13.21 นาที และใช้อุณหภูมิในช่วง 152.49 – 516.79 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.13)



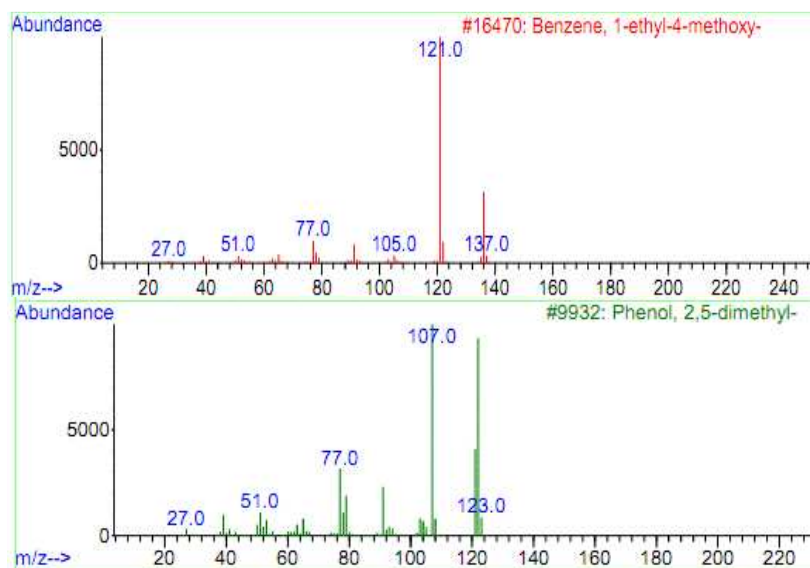
ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและผลได้ของประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี

จากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีของน้ำมันชีวภาพดังภาพที่ 4.14 พบว่า มีองค์ประกอบของเนฟทา (naphtha) ประมาณ 26.7 เปอร์เซ็นต์ โดยเนฟทาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 5 - 12 โมเลกุล เรียกอีกชื่อว่า กลุ่มแก๊สโซลีน หรือเบนซิน (Xiao and Yang, 2013; Zhou et al., 2013) ในช่วงถัดไปพบผลได้ของแครโซีน (kerosene) หรือพวกน้ำมันกาด อยู่ที่ 20.3 เปอร์เซ็นต์ โดยแครโซีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ 10 - 16 โมเลกุล และในช่วงสุดท้ายพบว่า ดีเซล (diesel) ซึ่งประกอบไปด้วย Light gas oil และ Gas oil มีผลได้ของน้ำมันอยู่ที่ 31 เปอร์เซ็นต์ โดย Light gas oil มีผลได้อยู่ที่ 29 เปอร์เซ็นต์ และ Gas oil มีผลได้อยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยดีเซลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 15-22 โมเลกุล

จากผลของสเปกตรัมที่ปรากฏ สามารถสรุปได้ว่า Phenol มีการแตกตัวของพันธะเกิดเบสพีก (base peak) ที่ 94 m/z เบสพีกรองลงมาอยู่ที่ 66 m/z ส่วน 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl มีเบสพีกอยู่ที่ 67 m/z และมีสัญญาณมีความเข้มรองลงมาคือ 110 m/z (ภาพที่ 4.15)



ภาพที่ 4.15 สเปกตรัมของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน; Phenol และ 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl



ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน; Benzene, 1-ethyl-4-methoxy และ Phenol, 2,5-dimethyl

จากผลของสเปกตรัมที่ปรากฏ สามารถสรุปได้ว่า Benzene, 1-ethyl-4-methoxy มีการแตกตัวของพันธะเกิดเบสพีค (base peak) ที่ 121 m/z ส่วน Phenol, 2,5-dimethyl มีเบสพีคอยู่ที่ 107 m/z และมีสัญญาณมีความเข้มรองลงมาคือ 77 m/z (ภาพที่ 4.16) และในการวิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนภายในน้ำมันชีวภาพพบ ชนิดของสารประกอบมากกว่า 80 ชนิด ดังแสดงตัวอย่างของสารประกอบบางชนิดที่สามารถพบได้ในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** สารประกอบทางเคมีที่พบในน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดียว

สารประกอบ (Compounds)	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล	การ Detection
Benzene, 1-ethyl-4-methoxy-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	136	*
1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	112.12	×
2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	110	×
Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	94.11	×
Phenol, 2,3-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 2,4-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 2,5-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 2,6-dimethoxy-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 2,6-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 2-ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 2-methoxy-	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	124	×
Phenol,2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	164.19	×
Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	164.19	×
Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	164.19	×
Phenol, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	108.13	×
Phenol, 3,4-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	108.13	×
Phenol, 4-ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	122.16	×
Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	152.18	×
Butanoic acid, 4 - hydroxyl-	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	104	*
2- Cyclopenten-1- one, 2-Methyl	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	96	×
2- Cyclopenten-1- one, 3-Methyl	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	96	*
3-Methyl- Cyclopentenone	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	96	×
3-Methyl-2- Cyclo	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	96	*
2,4- Dimethylfuran	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	96	*
3,4- Dimethyl	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	110	×
2,3- Dimethyl-2-Cyclopenten-1-one	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	110	*

\*Can not determined,    × Detected

#### 4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของน้ำมันชีวภาพ

จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์จากปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว พบว่า ปริมาณคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวมีค่าค่อนข้างสูงที่ 51.70 และ 62.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 4.6) ปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบมีผลสำคัญต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ ยังมีปริมาณคาร์บอนมากเท่าใด ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพจะสูงตามไปด้วยในเชิงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Huang et al., 2012; Angin, 2013; Gan and Yuan, 2013; Tessarolo et al., 2013) ส่วนธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน มีค่า 8.02, 2.05 และ 38.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชาร์ ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน มีค่า 4.67, 6.37 และ 10.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 4.6** ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์จากหญา  
คาของปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)	ปริมาณองค์ประกอบธาตุ [เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; (wt.%)]	
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
C	51.7	62.33
H	8.02	4.67
N	2.05	6.37
O	38.23	10.96

#### 4.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value)

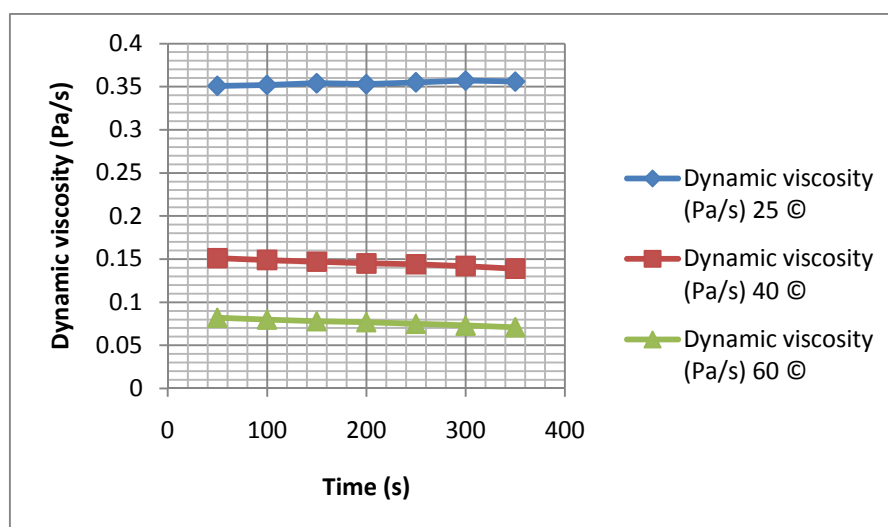
ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวอยู่ในช่วงประมาณ 20.53 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ถึง 25.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยมีแนวโน้มค่าความร้อนที่ลดลงตามช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความร้อนของถ่านชาร์พบว่า อยู่ในช่วงประมาณ 24.79 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ถึง 32.36 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 4.7) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Melligan et al, 2012 ได้ทำการไพโรไลซิสต้น Miscanthus ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 20.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนของถ่านชาร์เฉลี่ยเท่ากับ 23.25 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งถือได้ว่าค่าความร้อนของงานวิจัยข้างต้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าความร้อนจากการไพโรไลซิสหญ้าคา

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อน ของน้ำมันชีวภาพ (เมกะจูล/กิโลกรัม)	ค่าความร้อน ของถ่านชาร์ (เมกะจูล/กิโลกรัม)
400	25.57	32.36
450	23.20	27.67
500	20.53	24.79

#### 4.3.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer

ค่าความหนืด (viscosity) ของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.353 ปาสคาล/วินาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.136 ปาสคาล/วินาที และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.066 ปาสคาล/วินาที (ภาพที่ 4.17) จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นความหนืดที่ได้ลดลงเนื่องมาจาก ความร้อนมีผลทำให้โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัว (Kanaujia et al., 2013; Zhou et al., 2013; Cardoso and Ataide, 2013) ส่วนน้ำมันเบาที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าความหนืดน้อยมากจนเครื่อง Rheometer ไม่สามารถอ่านค่าได้



ภาพที่ 4.17 ค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.3.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ASTM D 93

โดยทั่วไปจุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลอยู่ที่ 40-70 องศาเซลเซียส (Lu, 2005) แต่ในกรณีนี้ไม่สามารถหาจุดวาบไฟของน้ำมันหนักได้ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันหนักได้ เมื่อนำไปหาจุดวาบไฟเกิดการระเหย ความดันไอของน้ำจะยับยั้งไอสารระเหยในน้ำมันทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส (Cardoso and Ataíde, 2013)

#### 4.3.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 1.5 จะเห็นว่าน้ำมันชีวภาพอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นกรดมากกว่าร้อยละ 7-12 ฟีนอล เมทานอล แอลกอฮอล์ ฮัลดีไฮด์ คีโตน (Lu et al., 2009; Xiao and Yang, 2013; Zhou et al., 2013)

#### 4.3.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

การกัดกร่อน (corrosion) นำน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสของหญ้าคา มาทำการทดลองการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154 โดยใช้ทองแดงจุ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.15 พบว่า ตัวอย่างน้ำมันเบามีแผ่นทองแดงที่ตรงกับแผ่นเทียบมาตรฐาน 2c ตรงกับค่า Moderate tarnish ซึ่งมีค่าการกัดกร่อนระดับปานกลาง



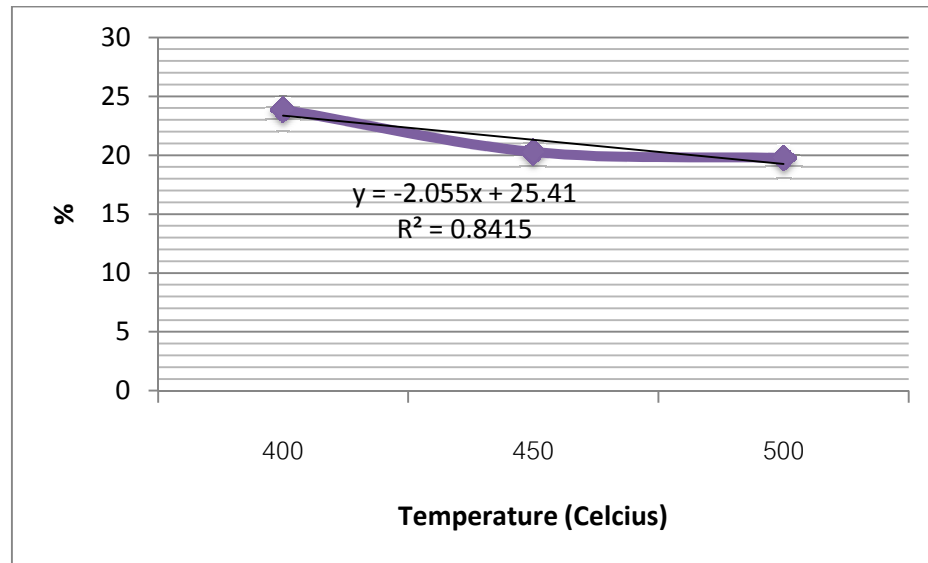
ภาพที่ 4.18 การกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

#### 4.4 ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูคู่

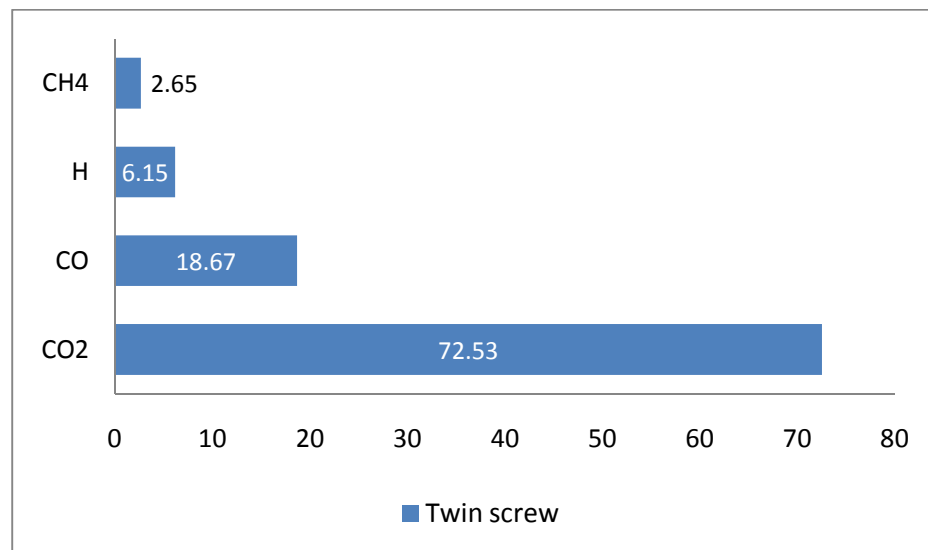


ภาพที่ 4.19 น้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่

จากผลการวิเคราะห์และคำนวณปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่ด้วยการกำหนดตัวแปรด้านอุณหภูมิ โดยมีหัว Burner เป็นตัวให้ความร้อนแก่หินกรวดกลมเพื่อสัมผัสและถ่ายโอนความร้อนให้แก่หญ้าคาทำให้เกิดการไพโรไลซิสหญ้าคาภายในสกรูคู่ได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้แก๊สไนโตรเจนเพื่อควบชีวมวลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ดังเช่นปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว พบว่า ปริมาณแก๊สที่พบอยู่ที่ 23.87, 20.27 และ 19.76 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพที่ 4.20) แก๊สที่วิเคราะห์ได้ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (72.53 เปอร์เซ็นต์) คาร์บอนมอนอกไซด์ (18.67 เปอร์เซ็นต์) ไฮโดรเจน (6.15 เปอร์เซ็นต์) และมีเทน (2.65 เปอร์เซ็นต์) (ภาพที่ 4.21) ซึ่งแก๊สออกซิเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการไพโรไลซิสชีวมวลเกิดได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.20 ผลได้เฉลี่ยของแก๊สจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่

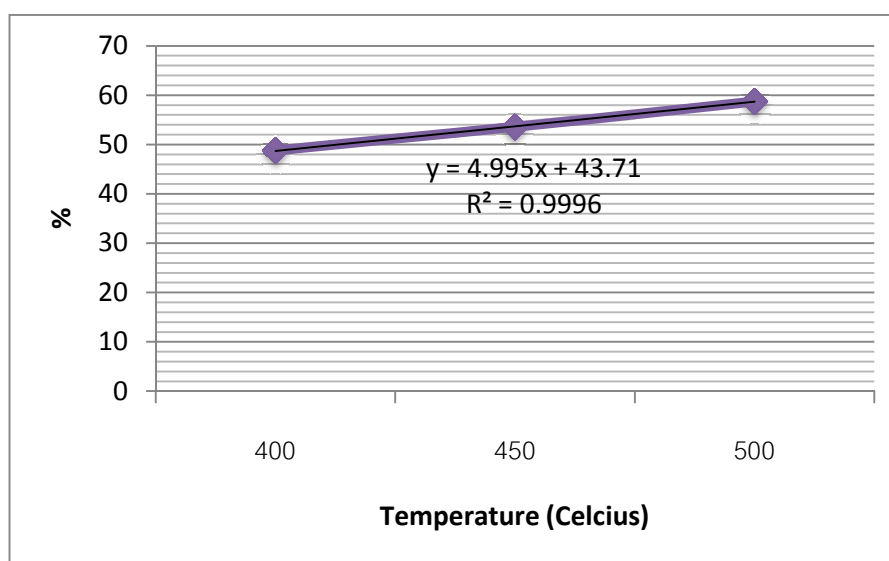


ภาพที่ 4.21 ปริมาณแก๊สชนิดต่างๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่

ปริมาณผลได้ที่มีส่วนจะเป็นของเหลว พบว่า มีค่าผลได้สูงสุดอยู่ที่ 58.75 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการแยกอยู่ที่ 37.39 เปอร์เซ็นต์ และ ที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ที่ 48.76 และ 53.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 4.22) ซึ่งได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการแยกอยู่ที่ 28.45 และ 31.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.8) จะเห็นได้ว่าปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่มีค่าค่อนข้างสูง คือ มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป แต่ผลได้ดังกล่าวปรากฏที่อุณหภูมิ 500



องศาเซลเซียส เท่านั้น ดังนั้น ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยงานวิจัยหลายฉบับ พบว่า ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลชนิดต่างๆ โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ หากไม่มีการเพิ่มคุณภาพ (upgrading) ของกระบวนการ (Li et al., 2009; Duan and Savage, 2011; Mortensen et al., 2011; Bilgen et al., 2012; Ioannidou, 2012; Ying et al., 2012; Gan and Yuan, 2013; Imam and Capareda, 2013; Zhou et al., 2013)

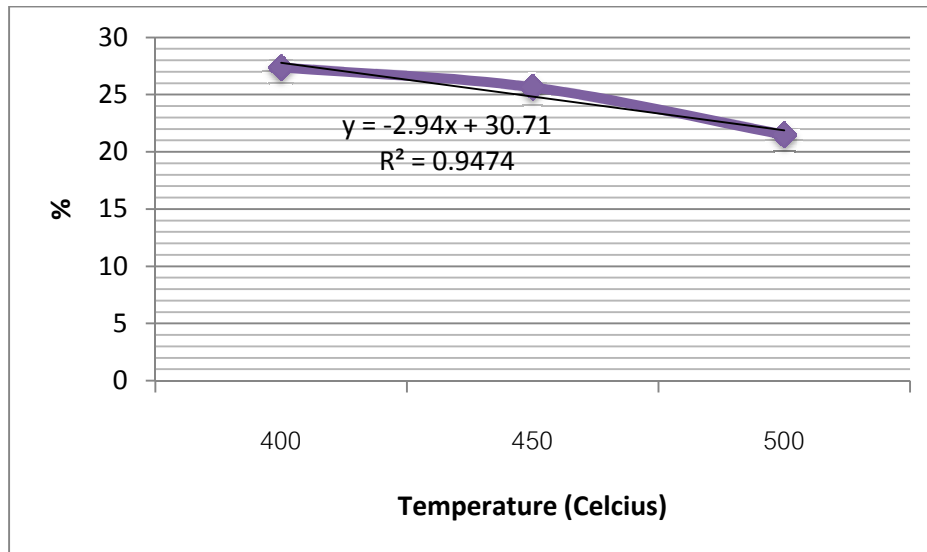


ภาพที่ 4.22 ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่

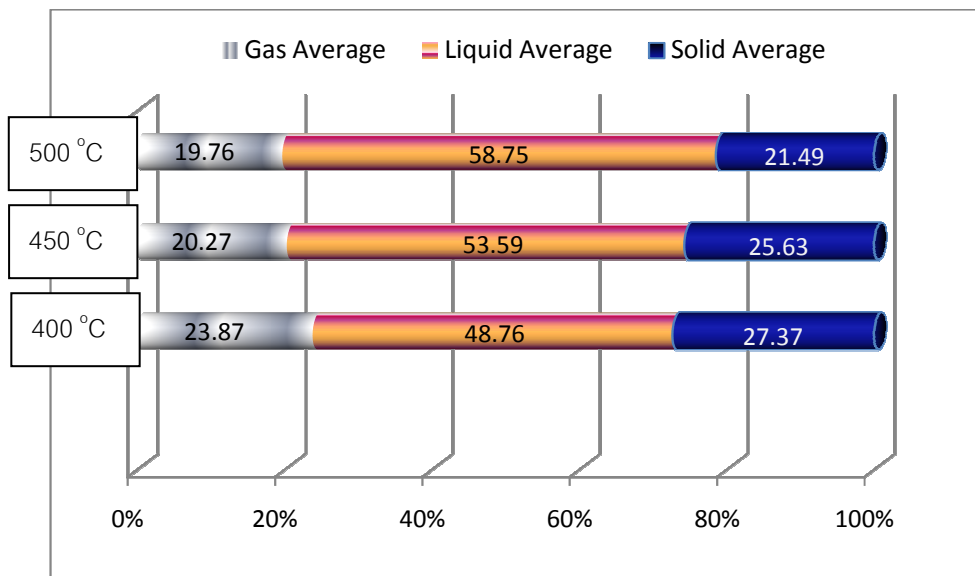
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพและน้ำมันเบาเมื่อทำการแยกออกจากของเหลวทั้งหมด

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ (wt.%)		
	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเบา	ของเหลวทั้งหมด
400	28.45	20.31	48.76
450	31.59	22.00	53.59
500	37.39	21.36	58.75

ปริมาณผลได้ของสถานะของแข็ง หรือถ่านชาร์ พบว่า มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ 27.37, 25.63 และ 21.49 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4.23) จากอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ ปริมาณของถ่านชาร์ที่ได้จะมีมากเมื่อเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์สกรูคู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 500 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าลดลงอย่างคงที่ ลักษณะกราฟที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิจึงมีความโค้งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



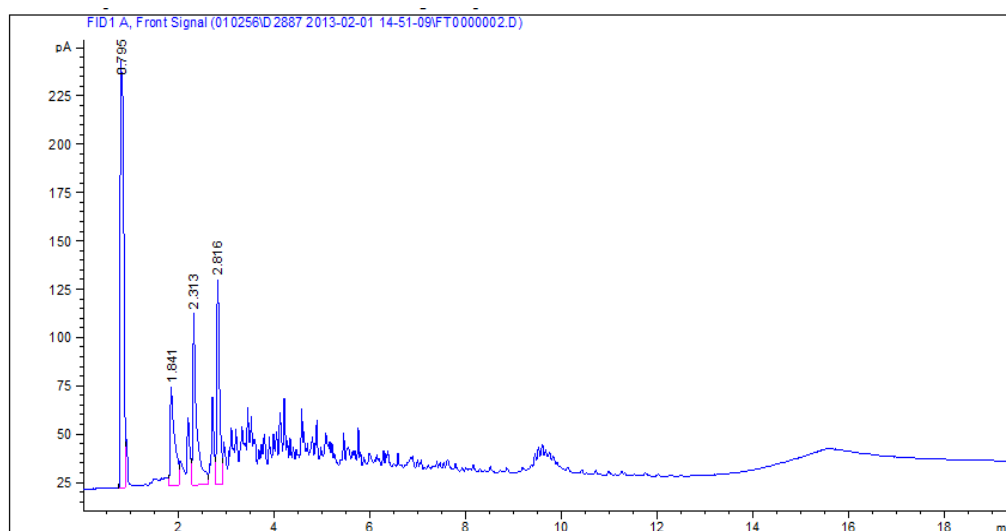
ภาพที่ 4.23 ผลได้เฉลี่ยของของแข็งจากการไพโรไลซิสหน้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่



ภาพที่ 4.24 สัดส่วนของผลได้เฉลี่ยของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหน้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยว ด้วยตัวแปรด้านอุณหภูมิในปฏิกรณ์สกรูคู่

#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสของปฏิกิริยาสุญญากาศ

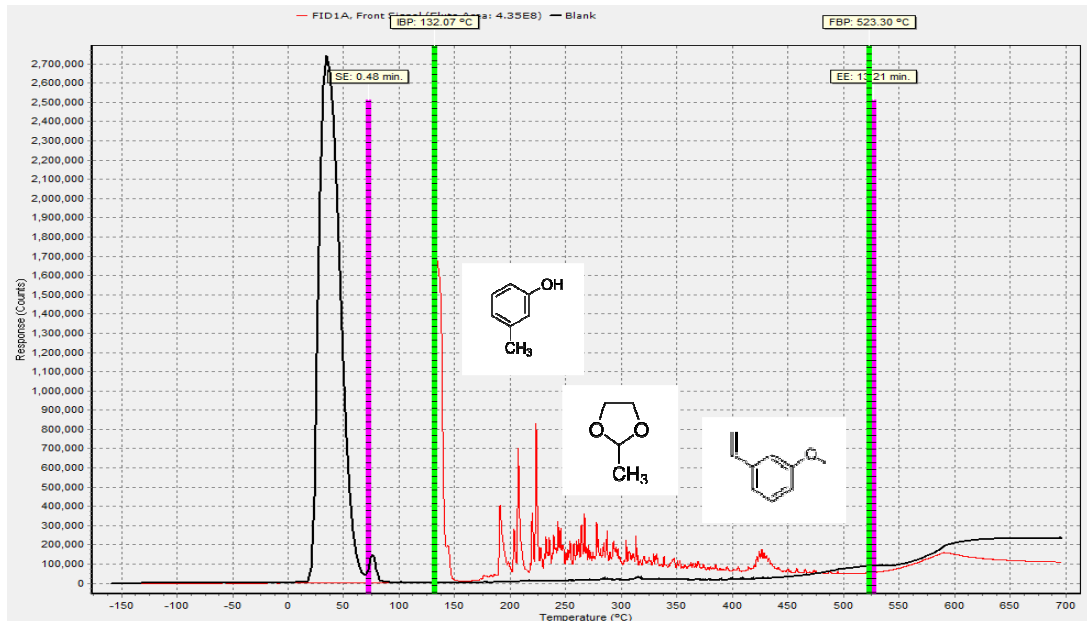
##### 4.5.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)



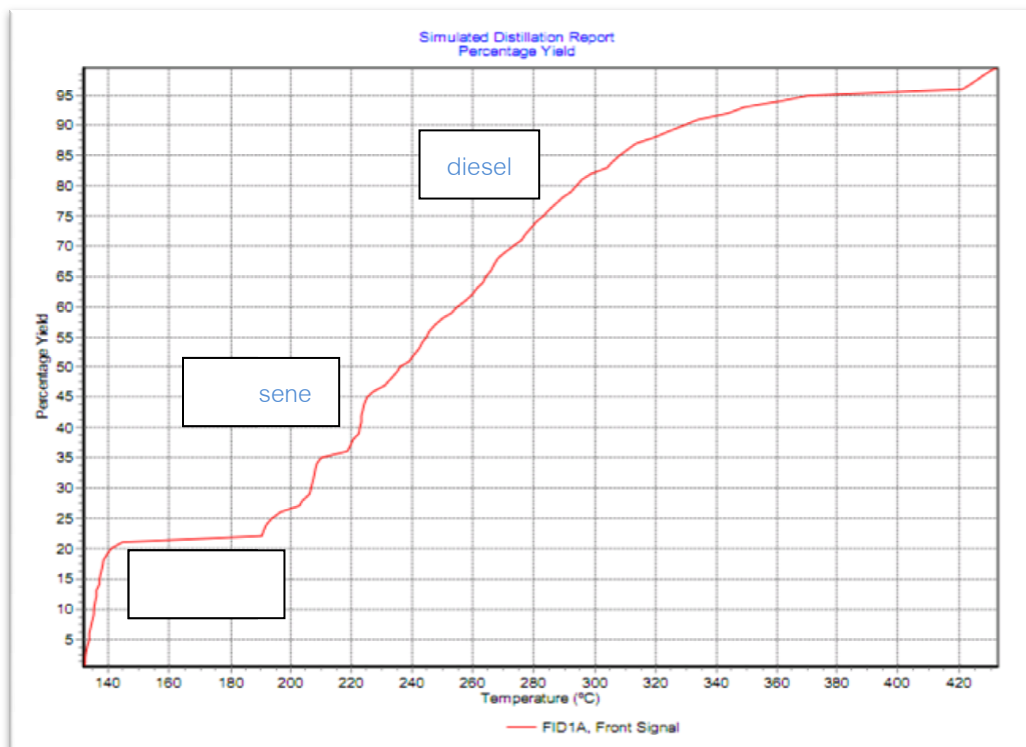
ภาพที่ 4.25 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญาาคด้วยปฏิกิริยาสุญญากาศ

จากกราฟในภาพ 4.25 เมื่อนำน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสหญาาคที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมาเป็นตัวอย่งในการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างและโมเลกุลด้วย GC และ GC-MS ซึ่งพบว่า พิกของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณของสารประกอบมากหรือน้อยดูจากพื้นที่ใต้พิก (area %) ซึ่งพบว่า ลำดับของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบตามปริมาณมีดังนี้ 1) C8 – C9 มีค่า 44.256%, 2) C11 – C12 มีค่า 22.430%, 3) C12 – C14 มีค่า 18.835%, 4) C10 – C11 มีค่า 14.477%

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญาาคด้วยปฏิกิริยาสุญญากาศ มีปริมาณของดีเซล แครโซีน และเนฟทา ที่สูง ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีโมเลกุลของคาร์บอนอยู่ที่ 5 – 22 นั่นคือ C5 – C22 (ภาพที่ 4.27) ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีนั้นใช้เวลาปฏิบัติการ (retention time) ในช่วง 0.48 – 12.21 นาที และใช้อุณหภูมิในช่วง 132.07 – 523.30 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.26)



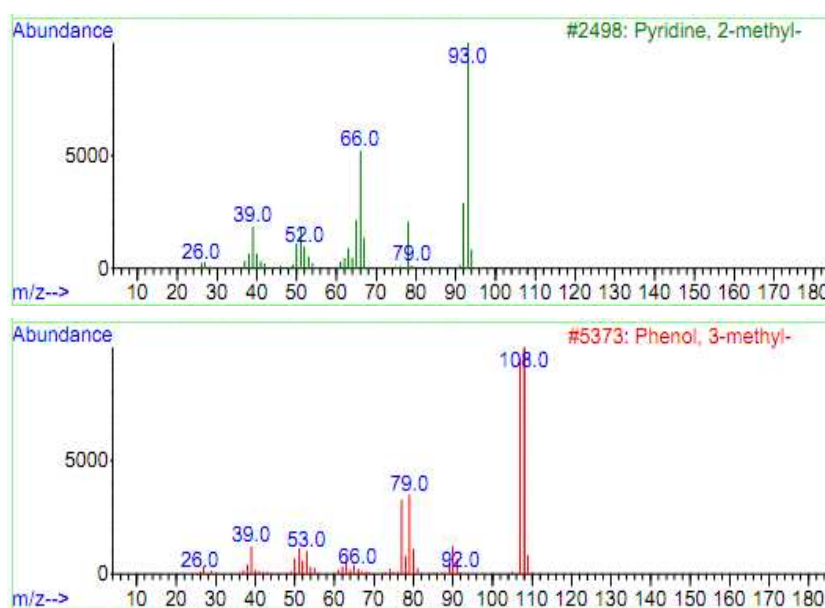
ภาพที่ 4.26 โคโรมาโทแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบ สกรูคู่เปรียบเทียบกับ Blank (เส้นสีดำ) และช่วงเวลาปฏิบัติการ (operate) ณ ช่วงเวลา และอุณหภูมิ จากเส้นลายสีชมพูและเขียว ตามลำดับ



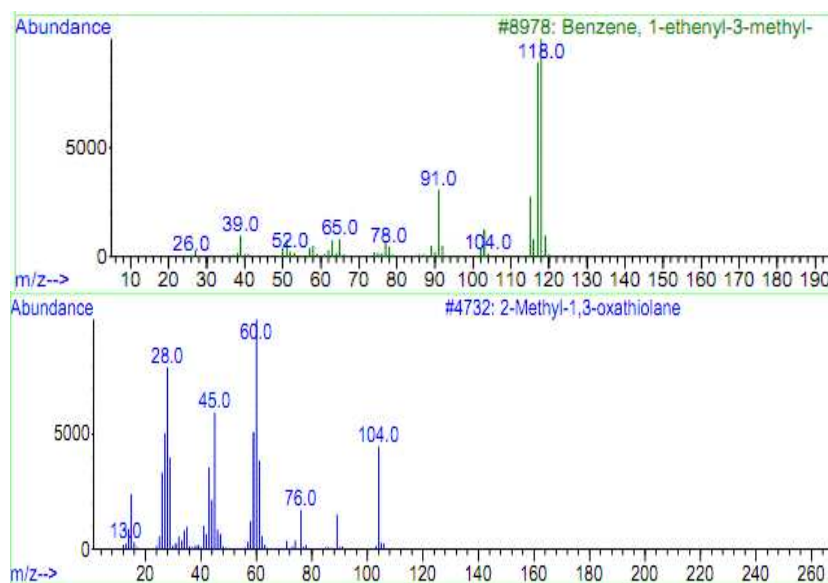
ภาพที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและผลได้ของประเภทสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี

จากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีของน้ำมันชีวภาพ ดังกราฟ 4.27 พบว่า มีองค์ประกอบของเนฟทาประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ โดยเนฟทาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 5 - 12 โมเลกุล เรียกอีกชื่อว่า กลุ่มแก๊สโซลีน หรือเบนซิน ในช่วงถัดไปพบผลได้ของแคโรซิน หรือพวงน้ำมันกาด อยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยแคโรซินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 10 - 16 โมเลกุล และในช่วงสุดท้ายพบว่า ดีเซล ซึ่งประกอบไปด้วย light gas oil และ gas oil มีผลได้ของน้ำมันอยู่ที่ 35 เปอร์เซ็นต์ โดย light gas oil มีผลได้อยู่ที่ 32 เปอร์เซ็นต์ และ gas oil มีผลได้อยู่ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยดีเซลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 15-22 โมเลกุล (Ben et al., 2013; Zhou et al., 2013)

จากผลของสเปกตรัมที่ปรากฏ สามารถสรุปได้ว่า Pyridine,2-methyl มีการแตกตัวของพันธะเกิดเบสพีก (base peak) ที่ 93 m/z สัญญาณมีความเข้มรองลงมาคือ 66 m/z ส่วน Phenol,3-methyl มีเบสพีกอยู่ที่ 108 m/z และมีสัญญาณมีความเข้มรองลงมาคือ 79 m/z (ภาพที่ 4.28)



ภาพที่ 4.28 สเปกตรัมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ; Pyridine,2-methyl และ Phenol,3-methyl



ภาพที่ 4.29 สเปกตรัมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ; Benzene, 1-ethenyl-3-methyl และ 2-Methyl-1,3-oxathiolane

จากผลของสเปกตรัมที่ปรากฏ สามารถสรุปได้ว่า Benzene, 1-ethenyl-3-methyl มีการแตกตัวของพันธะเกิดเบสพีก (base peak) ที่ 118 m/z สัญญาณมีความเข้มรองลงมาคือ 91 m/z ส่วน 2-Methyl-1,3-oxathiolane มีเบสพีกอยู่ที่ 60 m/z และมีสัญญาณมีความเข้มรองลงมาคือ 28 m/z (ภาพที่ 4.29)

ในการวิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนภายในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่ พบ ชนิดของสารประกอบมากกว่า 80 ชนิด โดยมีกลุ่มของฟีนอล คีโตน และเบนซิน เป็นกลุ่มหลักที่สำคัญ ดังแสดงตัวอย่างของสารประกอบบางชนิดที่สามารถพบได้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สารประกอบทางเคมีที่สำคัญบางชนิดที่พบในน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคา ด้วย  
ปฏิกรณ์แบบสกรูคู่

สารประกอบ (Compounds)	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล	การ detection
Benzene, 1-ethenyl-3-methyl	$C_9H_{12}$	120.19	×
Pyridine,2-methyl	$C_6H_7N$	93.12	×
2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	$C_7H_{10}O$	110	×
Phenol	$C_6H_6O$	94.11	×
2-Methyl-1,3-oxathiolane	$C_4H_8OS$	104.17	×
Phenol, 2,4-dimethyl-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 2,5-dimethyl-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 2,6-dimethoxy-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 2,6-dimethyl-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 2-ethyl-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 2-methoxy-	$C_7H_8O_2$	124	×
Phenol,2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	$C_{10}H_{12}O_2$	164.19	×
Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	$C_{10}H_{12}O_2$	164.19	×
Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	$C_{10}H_{12}O_2$	164.19	×
Phenol, 2-methyl-	$C_7H_8O$	108.13	×
Phenol, 3,4-dimethyl-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 3-methyl-	$C_7H_8O$	108.13	×
Phenol, 4-ethyl-	$C_8H_{10}O$	122.16	×
Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	$C_9H_{12}O_2$	152.18	×
Butanoic acid, 4 – hydroxyl-	$C_4H_8O_3$	104	*
Butyrolactone	$C_4H_6O_2$	86	*
2- Cyclopenten-1- one, 2-Methyl	$C_6H_8O$	96	×
2- Cyclopenten-1- one, 3-Methyl	$C_6H_8O$	96	*
3-Methyl- Cyclopentenone	$C_6H_8O$	96	×
3-Methyl-2- Cyclo	$C_6H_8O$	96	*
2,4- Dimethylfuran	$C_6H_8O$	96	*
3,4- Dimethyl	$C_7H_{10}O$	110	×
Phosphonic acid	$C_6H_7O_4P$	174	*
4- Hydroxybenzenephosphonic acid	$C_6H_7O_4P$	174	*
2,3- Dimethyl-2-Cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O$	110	*
2,3- Dimethyl	$C_7H_{10}O$	110	×
Mequinol	$C_7H_8O_2$	124	*

\*Can not determined,    × Detected

#### 4.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของน้ำมันชีวภาพ

จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์จากปฏิกรณ์แบบสกรูคู่ พบว่า ปริมาณคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่มีค่าค่อนข้างสูงที่ 53.23 และ 65.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบมีผลสำคัญต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ ยังมีปริมาณคาร์บอนมากเท่าใด ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพจะสูงตามไปด้วยในเชิงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Huang et al., 2012; Ying et al., 2012; Angin, 2013; Gan and Yuan, 2013; Tessarolo et al., 2013) ส่วนธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน มีค่า 9.57, 3.24 และ 33.96 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10) และธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชาร์ ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน มีค่า 3.26, 7.94 และ 11.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.10 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูคู่

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)	ปริมาณองค์ประกอบธาตุ [เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; (wt.%)]	
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
C	53.23	65.76
H	9.57	3.26
N	3.24	7.94
O	33.96	11.85

#### 4.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value)

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพอยู่ในช่วงประมาณ 21.56 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ถึง 27.45 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความร้อนที่ลดลงตามอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 24.33 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 4.11) ส่วนถ่านชาร์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.71 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Melligan et al, 2012 ได้ทำการไพโรไลซิสต้น Miscanthus ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 20.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนของถ่านชาร์เฉลี่ยเท่ากับ 23.25 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งถือได้ว่าค่าความร้อนของงานวิจัยข้างต้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าความร้อนจากการไพโรไลซิสหญ้าคา

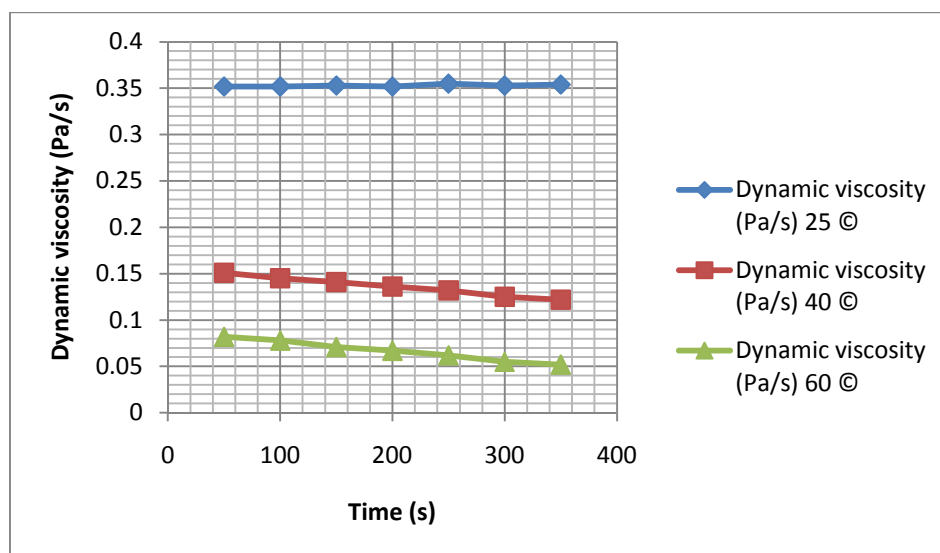


ตารางที่ 4.11 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ (เมกกะจูล/กิโลกรัม)	ค่าความร้อนของถ่านชาร์ (เมกกะจูล/กิโลกรัม)
400	27.45	33.45
450	24.00	29.13
500	21.56	26.56

#### 4.5.4 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer

ค่าความหนืด (viscosity) ของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.354 ปาสคาล/วินาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.145 ปาสคาล/วินาที และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเฉลี่ยอยู่ที่ 0.076 ปาสคาล/วินาที แสดงดังภาพที่ 4.30 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นความหนืดที่ได้ลดลงเนื่องมาจาก ความร้อนมีผลทำให้โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวส่วนน้ำมันเบาที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าความหนืดน้อยมากจนเครื่อง Rheometer ไม่สามารถอ่านค่าได้ (Kanaujia et al., 2013; Zhou et al., 2013; Cardoso and Ataíde, 2013)



ภาพที่ 4.30 ค่าความหนืดของน้ำมันหนักที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.3.5 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ASTM D 93

จุดวาบไฟ (flash point) โดยทั่วไปจุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 40-70 องศาเซลเซียส (Lu et al., 2008) แต่ในกรณีนี้ไม่สามารถหาจุดวาบไฟของน้ำมันหนักได้ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันหนักได้ เมื่อนำไปหาจุดวาบไฟเกิดการระเหย ความดันไอของน้ำจะยับยั้งไอสารระเหยในน้ำมันทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส (Cardoso and Ataíde, 2013)

#### 4.3.6 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของน้ำมันชีวภาพมีค่า 1.3 ซึ่งจะเห็นว่าน้ำมันชีวภาพอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดแก่ และมีความเข้มข้นกว่าในส่วนของน้ำมันดิบ ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นกรดมากกว่าร้อยละ 7-12 ฟีนอล เมทานอล แอลกอฮอล์ ฮัลด์ดีไฮด์ คีโตน (Lu et al., 2009)

#### 4.3.7 วิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ASTM D1130

การกัดกร่อน (corrosions) โดยนำน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของหญ้าคา ทำการทดลองการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D130/IP 154 ด้วยการใส่ทองแดงจุ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง พบว่า ตัวอย่างน้ำมันชีวภาพมีแผ่นทองแดงที่ตรงกับแผ่นเทียบมาตรฐาน 3a ตรงกับค่า Dark tarnish ซึ่งมีค่าการกัดกร่อนค่อนข้างสูง



ภาพที่ 4.31 สภาพการกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่

#### 4.6 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

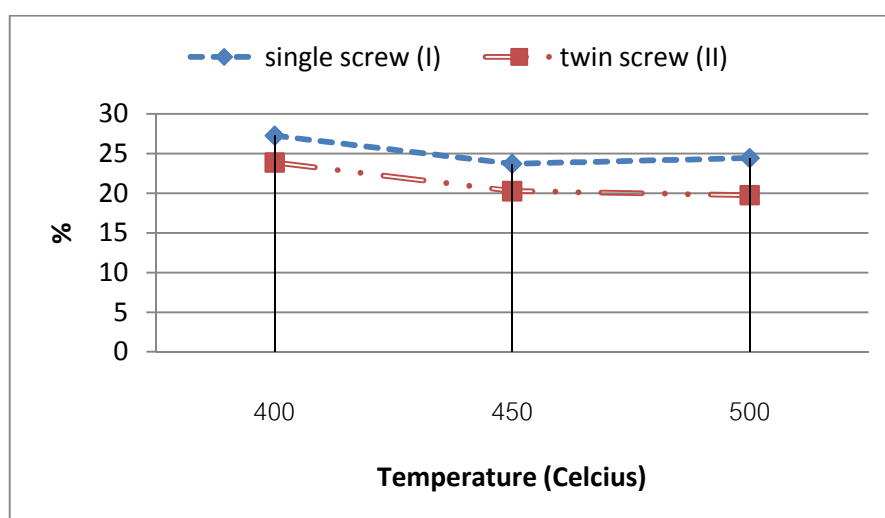


(ก)

(ข)

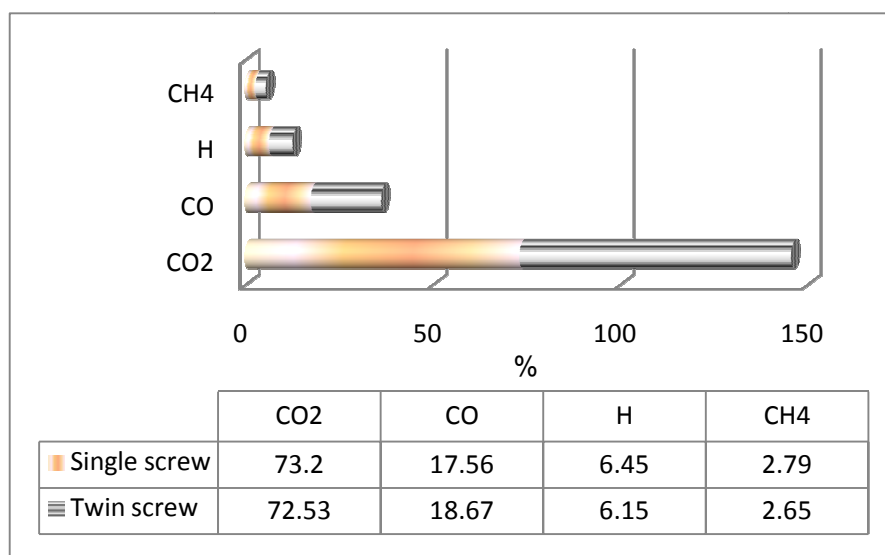
ภาพที่ 4.32 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (ก) และปฏิกรณ์สกรูคู่ (ข)

จากการคำนวณผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่ พบว่า ปริมาณผลได้ที่เป็นแก๊สในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวมีปริมาณที่สูง โดยมีค่า 27.27, 23.71 และ 24.43 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่ด้วยการกำหนดตัวแปรด้านอุณหภูมิ พบว่า ปริมาณแก๊สที่พบอยู่ที่ 23.87, 20.27 และ 19.76 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 4.33 ผลได้เฉลี่ยของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบของเตาในการถ่ายโอนความร้อนบริเวณผนังเตามีความร้อนสูง และคงตัว ปริมาณผลได้ที่เป็นแก๊สในปฏิกรณ์สกรูคู่ พบว่า มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยมีค่า 23.87, 20.27 และ 19.76 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพที่ 4.33)

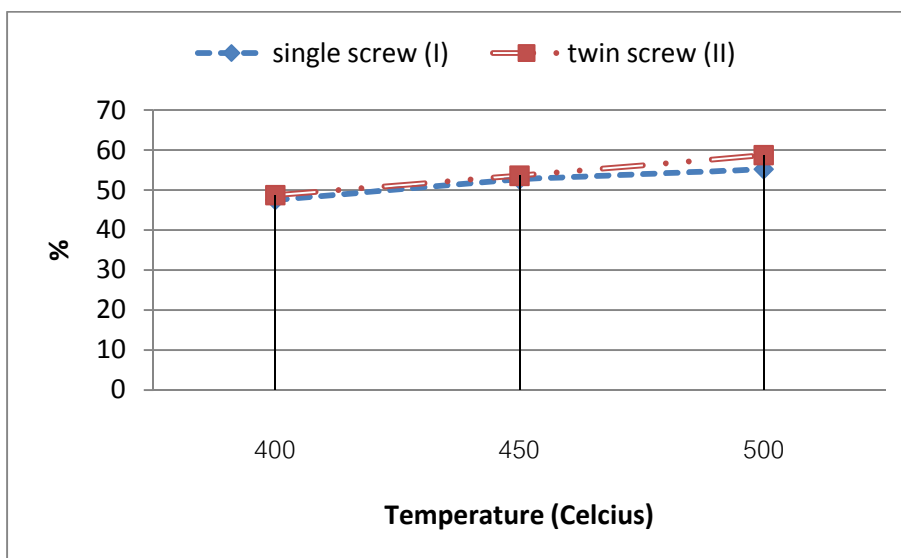


ภาพที่ 4.34 ชนิดและปริมาณแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และ สกรูคู่

โดยปริมาณการเกิดแก๊สและสารระเหยต่างๆ จะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ โดยในช่วง 155-200 องศาเซลเซียสจะเป็นการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-280 องศาเซลเซียสเป็นการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วงอุณหภูมิ 280-380 จะเป็นช่วงเริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณของสารระเหยไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มมากขึ้น จากการทดลอง จะพบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้สูงทั้งที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส โดยที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะพบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพมากที่สุด และจากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วย GC-MS ได้นำตัวอย่างน้ำมันชีวภาพที่ช่วงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มาใช้ในการวิเคราะห์

ในส่วนสถานะของเหลวในปฏิกรณ์สกรูเดียวนั้น พบว่า ค่าผลได้สูงสุดอยู่ที่ 55.23 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพอยู่ 33.76 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีผลได้อยู่ที่ 47.54 และ 52.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพอยู่ถึง 30.75 เปอร์เซ็นต์ และ 35.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่า

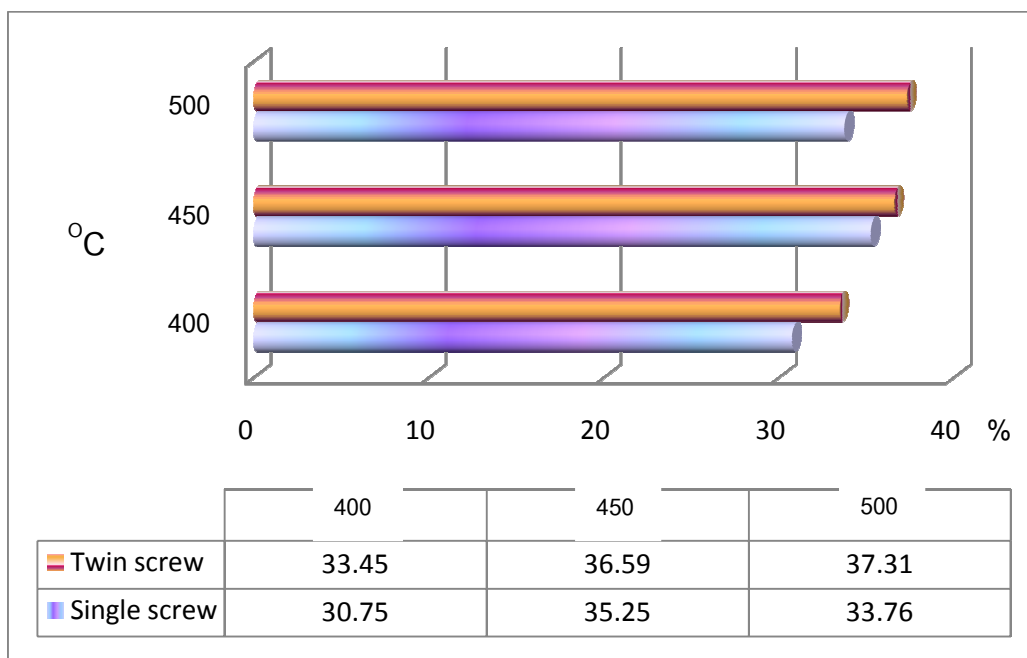
ผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ต่ำกว่า ปริมาณผลได้ในปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยพบสถานะเป็นของเหลวมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 58.75 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการแยกอยู่ที่ 37.39 เปอร์เซ็นต์ และ ที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ อยู่ที่ 48.76 และ 53.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการแยกอยู่ที่ 33.45 และ 36.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 4.35 และ 4.36) จากผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ 37.39 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชีวมวลชนิดอื่นๆ ได้แก่ ผักตบชวา ก้านปาล์มเปล่า ฟางข้าว เปลือกทุเรียน ใบยาสูบ พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากหญ้าคามีค่าผลได้สูงกว่า ส่วนน้ำมันชีวภาพที่ได้จาก ต้น Giant reed ถั่ว อัลฟาฟ่า ชี้อ้อย แกลบ พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากหญ้าคามีค่าผลได้ต่ำกว่า (สุพจน์, 2552; Mullen and Boateng, 2008; Zheng et al., 2008; Li et al., 2009; Duan and Savage, 2011; Mortensen et al., 2011; Promdee et al., 2011; Bilgen, 2012; Ioannidou, 2012; Ying et al., 2012; Aho et al., 2013; Cardoso and Ataíde, 2013; Gan and Yuan, 2013; Kanaujia et al., 2013; Imam and Capareda, 2013; Ly et al., 2013; Sanchez-Silva et al., 2013; Zhou et al., 2013)



ภาพที่ 4.35 ผลได้เฉลี่ยของของเหลวจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

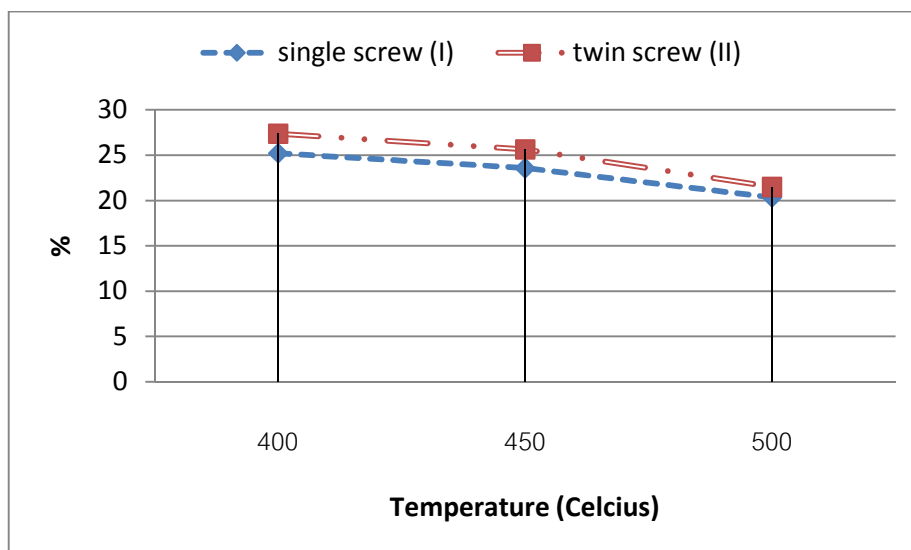
จะเห็นได้ว่า ผลการวิจัยการผลิตน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ได้ค่าน้ำมันสูงสุดที่ 33.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ถึง ดี เพราะปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ อยู่ในช่วง

30 – 40 เปอร์เซ็นต์ และผลิตน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ ได้ค่าน้ำมันสูงสุดที่ 37.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ ดี เพราะปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ อยู่ในช่วง 35 – 40 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.36 ผลได้เฉลี่ยของน้ำมันชีวภาพที่แยกได้จากของเหลวทั้งหมดจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่ โดยงานวิจัยหลายฉบับ พบว่า ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลชนิดต่างๆ โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ หากไม่มีการเพิ่มคุณภาพ (upgrading) ของกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นการใช้สารเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (catalysis) หรือการใช้สภาวะอุณหภูมิและความดันเป็นพิเศษ เป็นต้น ซึ่งอาจจะได้ปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็น 45 – 60 เปอร์เซ็นต์ (Li et al., 2009; Duan and Savage, 2011; Mortensen et al., 2011; Bilgen, 2012; Ioannidou, 2012; Ying et al, 2012; Aho et al., 2013; Gan and Yuan, 2013; Imam and Capareda, 2013; Ly et al., 2013; Sanchez-Silva et al., 2013; Zhou et al., 2013) ได้

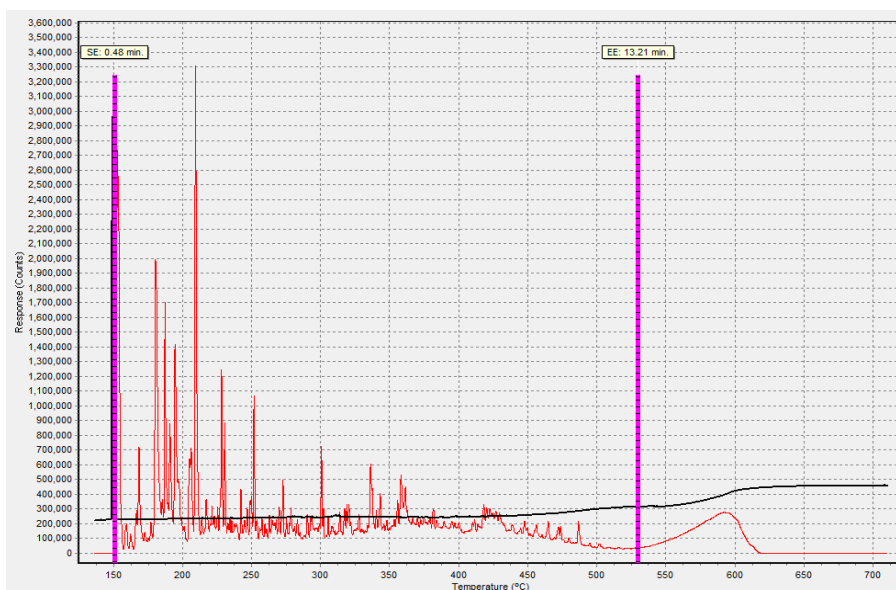


ภาพที่ 4.37 ผลได้เฉลี่ยของถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ในส่วนของถ่านชาร์ ซึ่งเป็นผลได้ที่อยู่ในสถานะของแข็ง พบว่า มีผลได้ที่ 25.22, 23.57 และ 20.34 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจัดได้ว่ามีปริมาณที่ต่ำ เนื่องมาจากการไพโรไลซิสชีวมวลที่ค่อนข้างคงที่ได้ส่วนที่มีสถานะของเหลวที่มากกว่า บางส่วนสูญเสียไปในรูปของแก๊ส ดังนั้น ส่วนของของแข็งหรือถ่านชาร์จึงเหลือตกค้างอยู่น้อย (Angin, 2013; Aho et al., 2013; Sorsa and Soimakallio, 2013) ปริมาณผลได้ที่สถานะของแข็ง หรือถ่านชาร์ พบว่า มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ 27.37, 25.63 และ 21.49 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ ปริมาณของถ่านชาร์ที่ได้จะมีมากเมื่อเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์สกรูคู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 500 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของถ่านชาร์ที่ได้มีค่าลดลงอย่างคงที่ ลักษณะกราฟที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิจึงมีความโค้งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังภาพที่ 4.37

#### 4.7 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส หญ้าคาของปฏิกรณ์กรูเดี่ยวและสกรูคู่

##### 4.7.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)



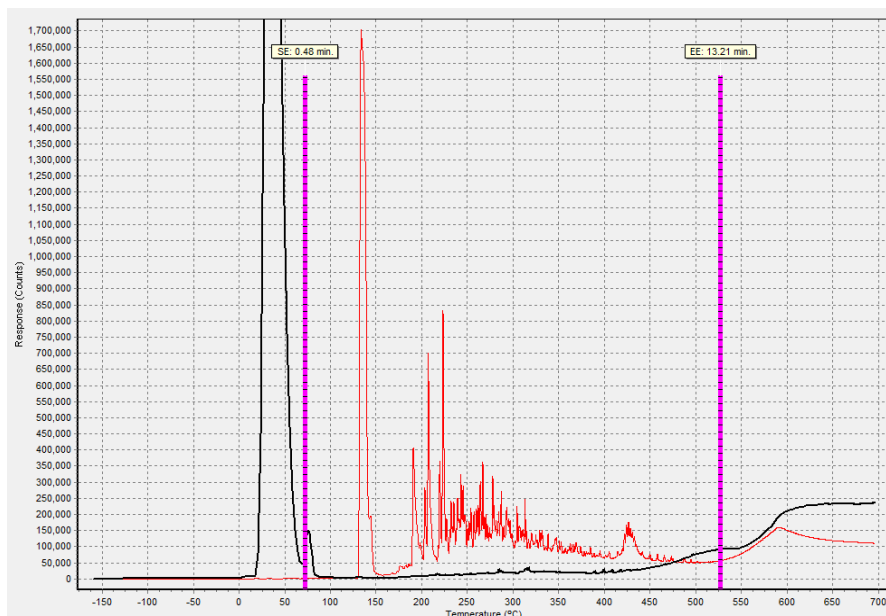
ภาพที่ 4.38 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว

จากกราฟในภาพ 4.38 พบว่า พีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณของสารประกอบมากหรือน้อยดูจากพื้นที่ใต้พีค (area %) ซึ่งพบว่า ลำดับของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบตามปริมาณมีดังนี้ 1)  $C_{40}$  ขึ้นไป มีค่า 19.024%, 2)  $C_5 - C_6$  มีค่า 14.527%, 3)  $C_9 - C_{10}$  มีค่า 13.148%, 4)  $C_{11} - C_{12}$  มีค่า 12.658%

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีปริมาณของดีเซล แครโธซีน และเนฟทา ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีโมเลกุลของคาร์บอนอยู่ที่ 5 – 22 นั่นคือ  $C_5 - C_{22}$  ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีนั้นใช้เวลปฏิบัติกร (retention time) ในช่วง 0.46 – 13.21 นาที

จากกราฟในภาพ 4.39 พบว่า พีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณของสารประกอบมากหรือน้อยดูจากพื้นที่ใต้พีค (area %) ซึ่งพบว่า ลำดับของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบตามปริมาณมีดังนี้ 1)  $C_8 - C_9$  มีค่า 44.256%, 2)  $C_{11} - C_{12}$  มีค่า 22.430%, 3)  $C_{12} - C_{14}$  มีค่า 18.835%, 4)  $C_{10} - C_{11}$  มีค่า 14.477%





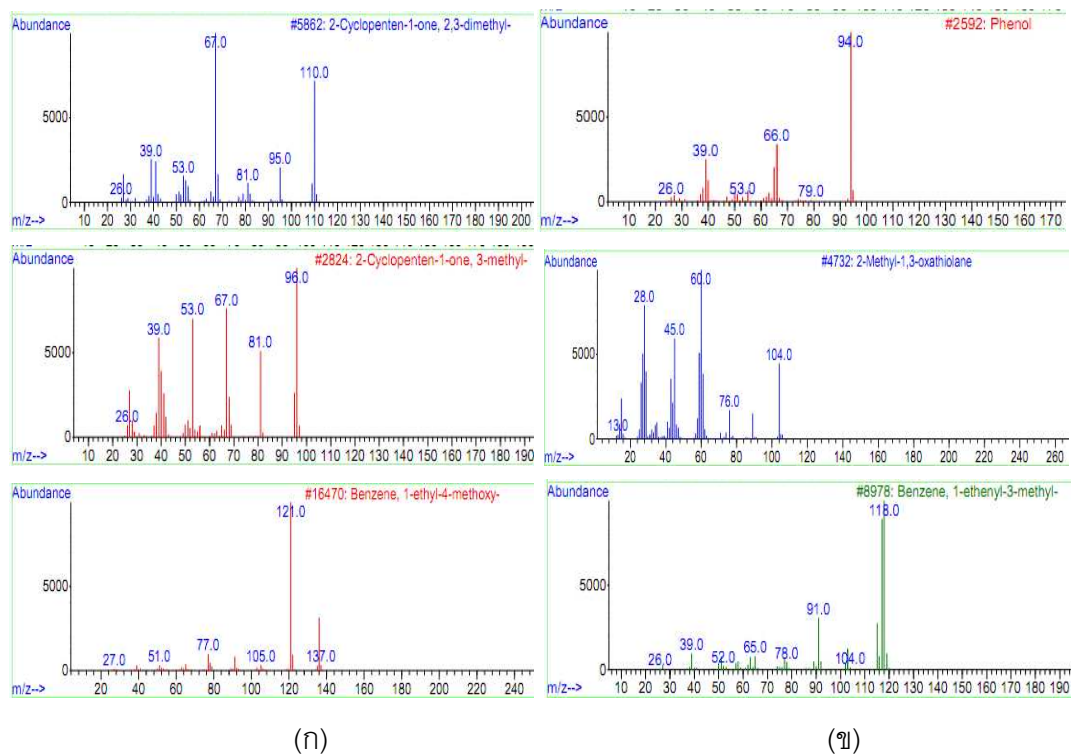
ภาพที่ 4.39 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์สกรูคู่

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูคู่ มีปริมาณของดีเซล แควโรซีน และเนฟทา ที่สูง ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีโมเลกุลของคาร์บอนอยู่ที่ 5 – 22 นั่นคือ C5 – C22 ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีนั้นใช้เวลาปฏิบัติการ (retention time) ในช่วงเวลา 0.48 – 12.21 นาที และใช้อุณหภูมิในช่วง 132.07 – 523.30 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว พบว่า มีองค์ประกอบของเนฟทา (naphtha) ประมาณ 26.7 เปอร์เซ็นต์ โดยเนฟทาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 5 - 12 โมเลกุล เรียกอีกชื่อว่า กลุ่มแก๊สโซลีน หรือเบนซิน ในช่วงถัดไปพบผลได้ของแควโรซีน (kerosene) หรือพวกน้ำมันกาด อยู่ที่ 20.3 เปอร์เซ็นต์ โดยแควโรซีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 10 - 16 โมเลกุล (Ben et al., 2013; Zhou et al., 2013) และในช่วงสุดท้ายพบว่า ดีเซล (diesel) ซึ่งประกอบไปด้วย light gas oil และ gas oil มีผลได้ของน้ำมันอยู่ที่ 31 เปอร์เซ็นต์ โดย light gas oil มีผลได้อยู่ที่ 29 เปอร์เซ็นต์ และ gas oil มีผลได้อยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยดีเซลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 15-22 โมเลกุล ส่วนในการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูคู่ พบว่า มีองค์ประกอบของเนฟทาประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ โดยเนฟทาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 5 - 12 โมเลกุล เรียกอีกชื่อว่า กลุ่มแก๊สโซลีน หรือเบนซิน (Ly et al., 2013; Zhou et al., 2013) ในช่วงถัดไปพบผลได้ของแควโรซีน หรือพวกน้ำมันกาด อยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ โดย

แคโรซินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 10 - 16 โมเลกุล และในช่วงสุดท้ายพบว่า ดีเซล ซึ่งประกอบไปด้วย light gas oil และ gas oil มีผลได้น้ำมันอยู่ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ โดย light gas oil มีผลได้อยู่ที่ 32 เปอร์เซ็นต์ และ gas oil มีผลได้อยู่ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยดีเซลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอยู่ที่ 15-22 โมเลกุล (Ben et al., 2013; Xiao and Yang, 2013)

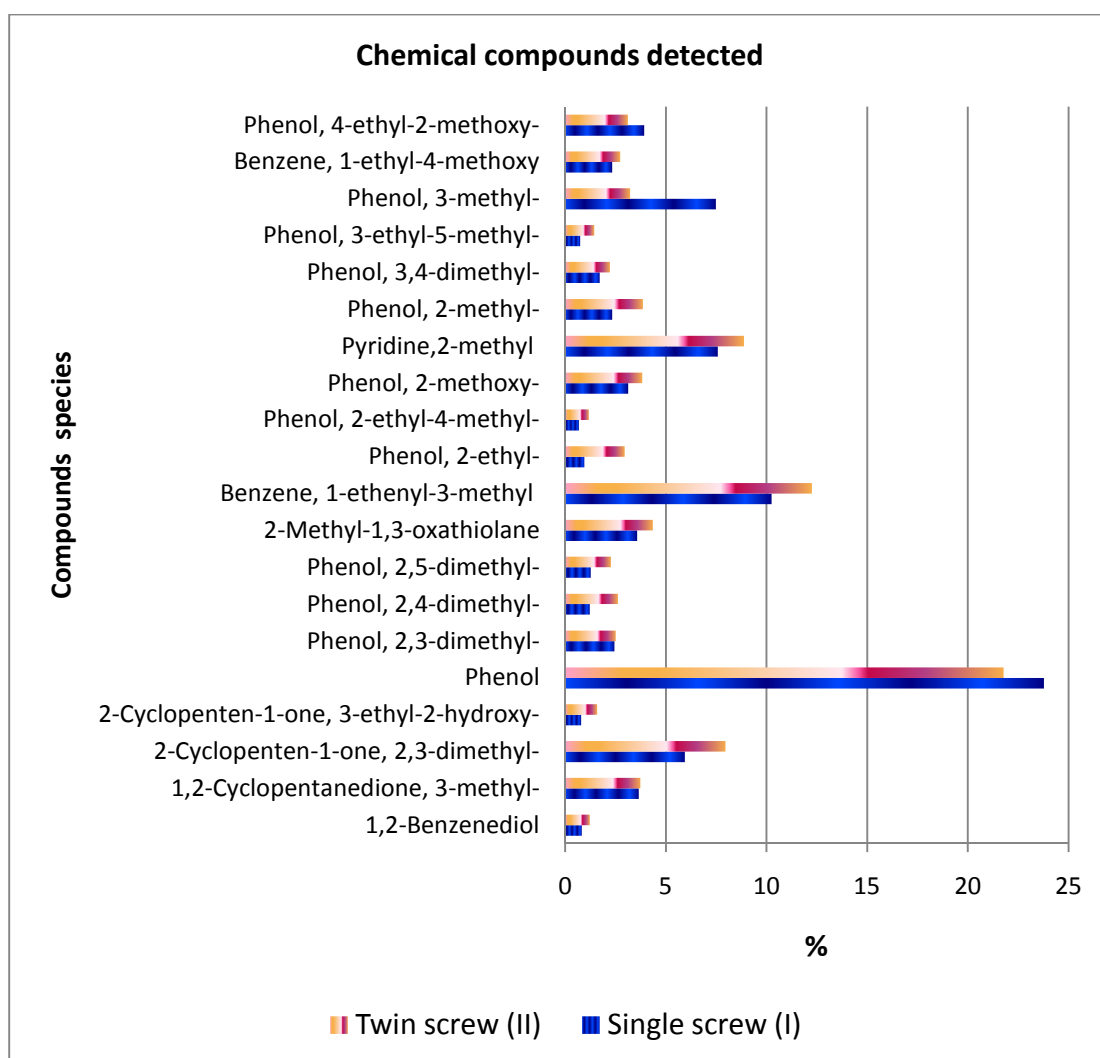
จากผลการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกูเดี่ยว และปฏิกรณ์สกูคู่ พบว่า น้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาที่ได้จากปฏิกรณ์สกูคู่ มีค่า สูงกว่า ปฏิกรณ์สกูเดี่ยว ในทุกประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้ง 3 จำพวกได้แก่ กลุ่มแก๊สโซลีน หรือเบนซิน กลุ่มแคโรซิน หรือพวกน้ำมันกาด และ กลุ่มดีเซล ที่ประกอบด้วย light gas oil และ gas oil จึงสรุปได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกูคู่มีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณและคุณภาพที่ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสกูเดี่ยว



ภาพที่ 4.40 สเปกตรัมของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญที่พบได้ในน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาทั้งปฏิกรณ์สกูเดี่ยว (ก) และสกูคู่ (ข)

สารประกอบทางเคมีที่สำคัญบางชนิดที่พบในน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคา ด้วยปฏิกรณ์สกูเดี่ยว และสกูคู่ พบว่า Phenol, Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine,2-methyl, 2-

Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl และ Phenol,3-methyl มีปริมาณที่พบในน้ำมันซีวภาพที่เกิดจากการไพโรไลซิสหญ้าคาจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่ ดังภาพที่ 4.40 และในภาพที่ 4.41 แสดงปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่ง พบว่า น้ำมันซีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ประกอบด้วย Phenol (23.78%), Benzene, 1-ethyl-3-methoxy (10.25%), Pyridine,2-methyl (7.58%), 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl (5.95%) และ Phenol,3-methyl (7.48%) ส่วนน้ำมันซีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่ประกอบด้วย Phenol (21.78%), Benzene, 1-ethyl-3-methoxy (12.25%), Pyridine,2-methyl (8.88%), 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl (7.97%) และ Phenol,3-methyl (3.23%)



ภาพที่ 4.41 การเปรียบเทียบปริมาณของชนิดสารประกอบทางเคมีบางชนิดจากน้ำมันซีวภาพจากหญ้าคาในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่

จะเห็นได้ว่าปริมาณของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบในปริมาณมาก 5 อันดับแรก ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ซึ่งสรุปได้ว่า Phenol และ Phenol,3-methyl มีปริมาณมากกว่าในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ส่วน Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine,2-methyl และ 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl มีปริมาณมากกว่าในปฏิกรณ์สกรูคู่

#### 4.7.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่า องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาของปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ พบว่า ปริมาณคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่ (53.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าสูงกว่าปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (51.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เล็กน้อย (ตารางที่ 4.12) ปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบมีผลสำคัญต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ ยังมีปริมาณคาร์บอนมากเท่าใด ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพจะสูงตามไปด้วยในเชิงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Huang et al., 2012; Ying et al., 2012; Angin, 2013; Gan and Yuan, 2013; Tessarolo et al., 2013) และการปรับปรุงหรือเพิ่มคุณภาพของน้ำมันชีวภาพต่อการนำไปสู่กระบวนการกลั่นแยกเชื้อเพลิงต่อไป

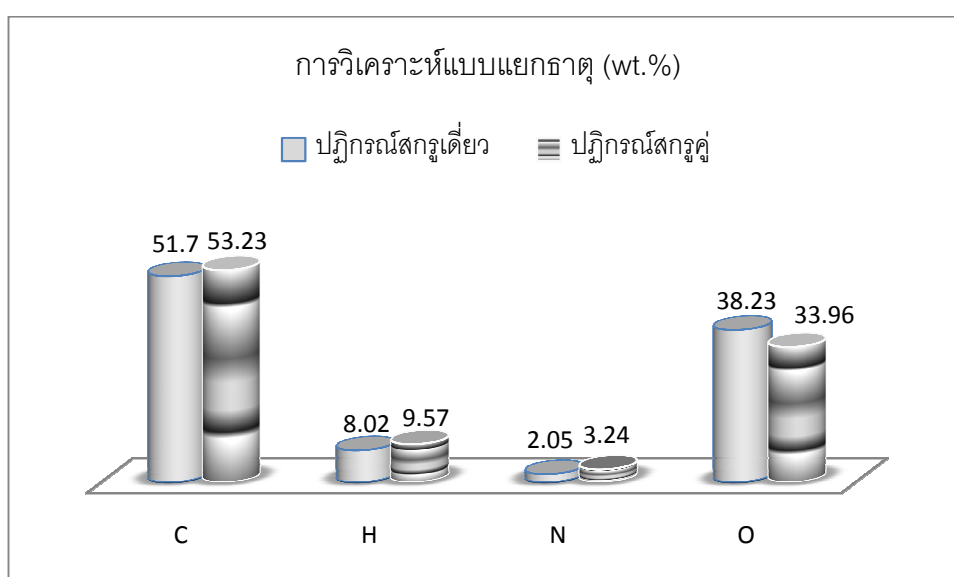
ตารางที่ 4.12 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)	องค์ประกอบธาตุ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว [เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; (wt.%)]		องค์ประกอบธาตุ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกรณ์สกรูคู่ [เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; (wt.%)]	
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
	C	51.70	62.33	53.23
H	8.02	4.67	9.57	3.26
N	2.05	6.37	3.24	7.94
O	38.23	10.96	33.96	11.85

ในส่วน of ปริมาณออกซิเจนที่วิเคราะห์ได้ พบว่า ปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่ (33.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าต่ำกว่าปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (38.23

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งปริมาณออกซิเจนมีผลต่อคุณภาพของน้ำมัน หากมีปริมาณที่สูงเกินไปในการทดลองไม่ต้องการผลของออกซิเจนที่สูงซึ่งผลการวิเคราะห์จัดว่าออกซิเจนอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง (Butler et al, 2013; Cardoso and Ataíde, 2013; Sanchez-Silva et al, 2013; Tessarolo et al, 2013) จึงทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ค่อนข้างมีคุณภาพที่ดี ส่วนปริมาณไฮโดรเจนของน้ำมันชีวภาพ พบว่ามีปริมาณ 8.02 และ 9.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ตามลำดับ และปริมาณไนโตรเจนของน้ำมันชีวภาพ พบว่ามีปริมาณ 2.05 และ 3.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.35) โดยทั้งไฮโดรเจนและไนโตรเจนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่มีปริมาณต่ำ ซึ่งไม่มีผลต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพเท่าใดนัก ถ้าเปรียบเทียบกับคาร์บอนและออกซิเจน

ปริมาณองค์ประกอบของธาตุที่พบในถ่านชาร์ พบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์บสกรูคู่ มีปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบที่สูงกว่าในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ส่วนธาตุอื่นๆ อย่างเช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน พบว่า มีปริมาณใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 4.42)



ภาพที่ 4.42 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาของปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่

#### 4.7.3 การเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์องค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value) ใน ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวอยู่ในช่วงประมาณ 20.53 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ถึง 25.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยมีค่าที่ลดลงตามอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ ส่วนค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูคู่อยู่ในช่วงประมาณ 21.56 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ถึง 27.45 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยมีค่าที่ลดลงตามอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์

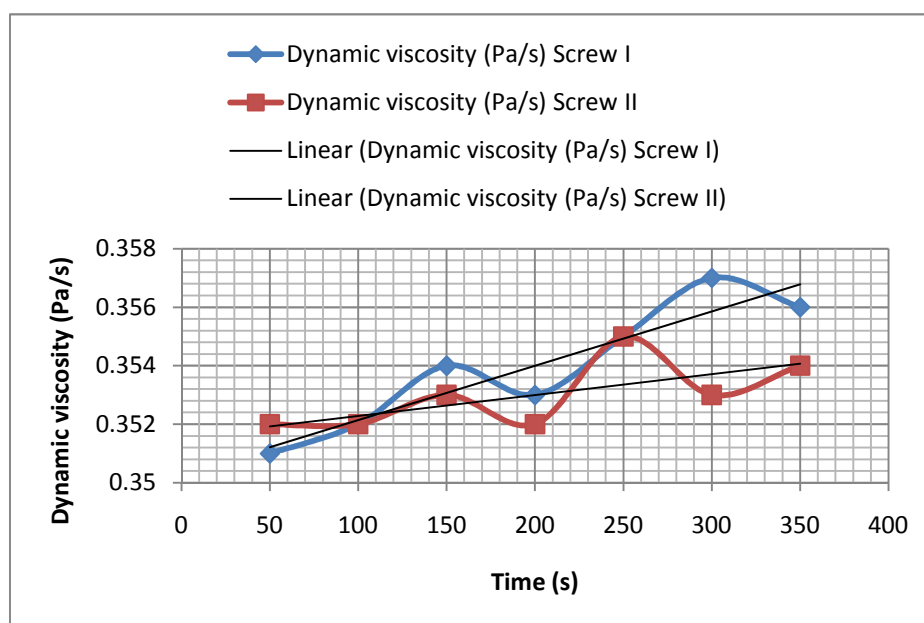
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และ  
สกรูคู่

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อน ผลิตภัณฑ์จากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (เมกกะจูล/กิโลกรัม)		ค่าความร้อน ผลิตภัณฑ์จากปฏิกรณ์สกรูคู่ (เมกกะจูล/กิโลกรัม)	
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
400	25.57	32.36	27.45	33.45
450	23.20	27.67	24.00	29.13
500	20.53	24.79	21.56	26.56

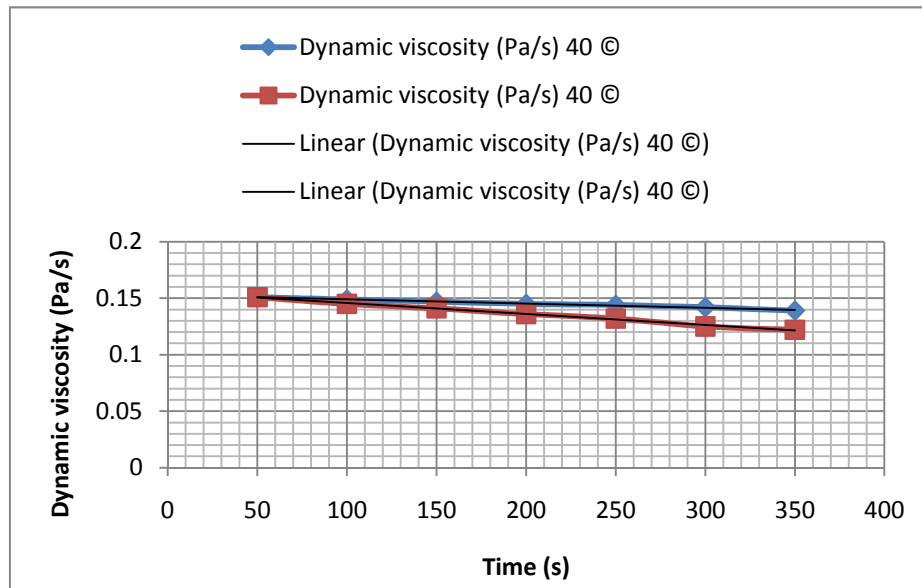
เมื่อทำการเปรียบเทียบพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่มีค่าความร้อนที่  
ปลดปล่อยมากกว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ทุกช่วงอุณหภูมิ โดยมีแนวโน้มค่า  
ความร้อนที่ลดลงตามช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.13) ทั้ง  
สองแบบของปฏิกรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Melligan et al, 2012 ได้ทำการไพโรไลซิส  
ต้น Miscanthus ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเฉลี่ย  
เท่ากับ 20.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนของถ่านชาร์เฉลี่ยเท่ากับ 23.25 เมกกะจูลต่อ  
กิโลกรัม ซึ่งถือได้ว่าค่าความร้อนของงานวิจัยข้างต้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าความร้อนจากการ  
ไพโรไลซิสหญ้าคา และในงานวิจัยของ Angin, 2013 ซึ่งได้ทำการไพโรไลซิสเมล็ด Safflower ที่  
อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเท่ากับ 30.27 เมกกะจูลต่อ  
กิโลกรัม ซึ่งถือได้ว่าค่าความร้อนของงานวิจัยข้างต้นมีสูงกว่าค่าความร้อนจากการไพโรไลซิสต้น  
Miscanthus และ หญ้าคา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าปัจจัยความแตกต่างด้านอุณหภูมิที่ใช้ในการ  
ทดลองมีผลต่อการทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนของผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน

#### 4.7.4 การเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์ความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer ใน ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

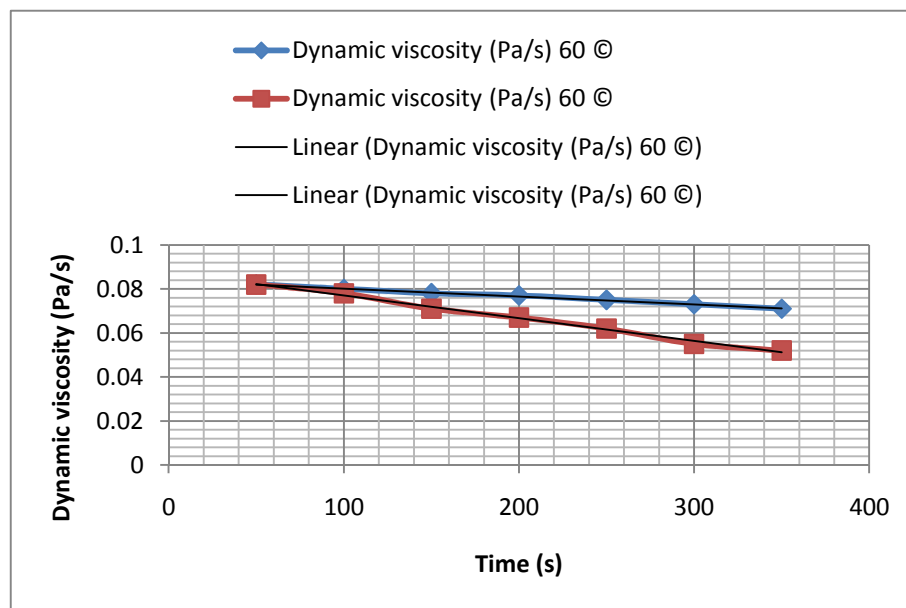
ค่าความหนืด ของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และคู่ ได้ทำการวิเคราะห์ตามรูปแบบการวิเคราะห์มาตรฐานที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีค่าเฉลี่ยของความหนืดต่ำกว่าปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.353 และ 0.354 ปาสคาล/วินาที ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีค่าเฉลี่ยของความหนืดสูงกว่าปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.136 และ 0.145 ปาสคาล/วินาที และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีค่าเฉลี่ยของความหนืดสูงกว่าปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.066 และ 0.076 ปาสคาล/วินาที ตามลำดับ เช่นเดียวกับที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.43, 4.44 และ 4.45)



ภาพที่ 4.43 ค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (screw I) และสกรูคู่ (screw II) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.44 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (screw I) และสกรูคู่ (screw II) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.45 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (screw I) และสกรูคู่ (screw II) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



#### 4.7.5 การเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

จุดวาบไฟ (flash point) โดยทั่วไปจุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 40-70 องศาเซลเซียส (Lu et al., 2008) แต่ในกรณีนี้ไม่สามารถหาจุดวาบไฟของน้ำมันหนักได้ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันหนักได้ เมื่อนำไปหาจุดวาบไฟเกิดการระเหย ความดันไอของน้ำจะยับยั้งไอสารระเหยในน้ำมันทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส (Cardoso and Ataíde, 2013)

#### 4.7.6 การเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่มีค่า 1.5 และ 2.5ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำมันชีวภาพทั้งสองแหล่งอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด และมีความเข้มข้นกว่าในส่วนของการนำมันดิบทั่วไป ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันน้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยสารประกอบที่เป็นกรดมากกว่าร้อยละ 7-12 ซึ่งประกอบไปด้วย ฟีนอล เมทานอล แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ คีโตน (Lu et al., 2009; Cardoso and Ataíde, 2013)

#### 4.7.7 การเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐานในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

การกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่จากไพโรไลซิสของหญ้าคา ทำการทดลองวิเคราะห์โดยการกัดกร่อนตามมาตรฐาน โดยใช้ทองแดงจุ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงแสดงดังภาพที่ 4.39 ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวพบค่าพบค่าการกัดกร่อนตรงกับมาตรฐาน 2c ตรงกับค่า Moderate corrosive ซึ่งมีค่าการกัดกร่อนปานกลาง ส่วนในปฏิกรณ์สกรูคู่ การกัดกร่อนตรงกับมาตรฐาน 3a ซึ่งทั้งสองขึ้นตรงกับค่า Dark tarnish ซึ่งมีค่าการกัดกร่อนค่อนข้างสูง



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.46 การกัดกร่อนของน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาที่ได้จากการไพโรไลซิสจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (ก) และสกรูคู่ (ข)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการไพโรไลซิสหญ้าคาในเครื่องปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่ สามารถสรุปผลการวิจัยรวบยอดออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆ คือ 1) สมบัติพื้นฐานของหญ้าคา 2) ผลได้ของผลิตภัณฑ์และสภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิส และ 3) สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันชีวภาพและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ซึ่งการสรุปผลการวิจัยมีหัวข้อและรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานหญ้าคา

ผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของหญ้าคา สรุปได้ว่า หญ้าคาประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพเป็นอย่างยิ่ง คือ 1) มีค่าไฮโลเซลลูโลส สูงสุดที่ 63.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ ลิกนิน โดยมีค่า 43.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งถือได้ว่าหญ้าคาประกอบด้วยส่วนที่สำคัญสองประการในปริมาณที่สูง ไฮโลเซลลูโลส และ ลิกนิน มีผลต่อการกำหนดคุณภาพของน้ำมันชีวภาพเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ทั้งแบบช้าและแบบเร็ว (Ben et al., 2013; Zhou et al., 2013) และ 2) มีปริมาณสารระเหยที่ประกอบอยู่ในหญ้าคาซึ่งสูงถึงร้อยละ 60.10 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นที่เป็นองค์ประกอบเพียง 0.60 เปอร์เซ็นต์ สองส่วนประกอบนี้ในการวิเคราะห์แบบรวมเป็นการบ่งบอกถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมของหญ้าคาต่อการใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตน้ำมันชีวภาพและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Angin, 2013; Ohra-Aho et al., 2013) การใช้หญ้าคาที่มีส่วนประกอบหลักๆ ดังที่ได้กล่าวมาเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานทดแทนในรูปของน้ำมันชีวภาพ จึงจัดได้ว่าเป็นการใช้เศษวัชพืชให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งการกำจัดหญ้าคาบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้ายังไม่ประสบความสำเร็จในการใช้วิธีการต่างๆ อย่างเช่น การเผา การฝังกลบ การทำปุ๋ยหมัก ในบางกรณีมีการนำไปเทกอง ทำให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะเป็นอย่างมาก ดังนั้น การกำจัดหญ้าคาโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสให้เป็นน้ำมันชีวภาพจึงถือได้ว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในปัจจุบัน

5.1.2 ผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกูคูเดียวและสกูคู

ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกูคู โดยใช้อัตราการป้อน 2-5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้สถานะที่เป็นของเหลวสูงสุดอยู่ที่ 58.75 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเมื่อทำการแยกอยู่ที่ 37.39 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าสูงกว่า ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยปฏิกรณ์สกูคูเดียว ที่มีอัตราการป้อน 1.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าผลได้สูงสุดอยู่ที่ 55.23 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 33.76 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การผลิตน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสระหว่างปฏิกรณ์สกูคูเดียวและปฏิกรณ์สกูคู พบว่า ปฏิกรณ์สกูคู มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ในอัตราส่วนผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ 37.39 ต่อ 33.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ทั้งในปฏิกรณ์สกูคูเดียวและปฏิกรณ์สกูคู

5.1.3 สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันชีวภาพและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ได้จากการ ไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกูคูเดียวและสกูคู

5.1.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสหญ้าคาด้วยปฏิกรณ์สกูคู มีปริมาณของดีเซล แครโธซีน และเนฟทา ที่สูงกว่า ในปฏิกรณ์สกูคูเดียว ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีโมเลกุลของคาร์บอนอยู่ที่ 5 - 22 นั่นคือ C5 - C22 ส่วนเมื่อทำการวิเคราะห์ต่อเนื่องด้วยแมสสเปกโตรพบว่ามีสารประกอบทางเคมีที่สำคัญบางชนิดที่พบในน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคา ด้วยปฏิกรณ์สกูคูเดียว และ สกูคู มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เด่นชัดเช่นเดียวกัน เพียงแต่แตกต่างกันที่ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ อันได้แก่ ชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่พบมาก 5 อันดับแรก ต่อไปนี้ คือ Phenol, Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine, 2-methyl, 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl และ Phenol, 3-methyl โดยที่น้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาที่ได้จากปฏิกรณ์สกูคูมีปริมาณ Benzene, 1-ethyl-3-methoxy, Pyridine, 2-methyl, 2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl ที่มากกว่าน้ำมันชีวภาพจากหญ้าคาที่ได้จากปฏิกรณ์สกูคูเดียว

### 5.1.3.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของน้ำมันชีวภาพในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ปริมาณคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่ (53.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าสูงกว่าปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (51.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เล็กน้อย ปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบมีผลสำคัญต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้ ยังมีปริมาณคาร์บอนมากเท่าใด ประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพจะสูงตามไปด้วยในเชิงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ ปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่ (33.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มีค่าต่ำกว่าปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว (38.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งปริมาณออกซิเจนมีผลต่อคุณภาพของน้ำมัน หากมีปริมาณที่สูงเกินไป ในการทดลองไม่ต้องการผลของออกซิเจนที่สูงซึ่งผลการวิเคราะห์จัดว่าออกซิเจนอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง (Butler et al, 2013; Cardoso and Ataíde, 2013; Sanchez-Silva et al, 2013; Tessarolo et al, 2013) จึงทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ค่อนข้างมีคุณภาพที่ดี

### 5.1.3.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบโดยค่าความร้อน (heating value) ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

น้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูคู่มีค่าความร้อนที่ปลดปล่อยมากกว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว ทุกช่วงอุณหภูมิ โดยมีแนวโน้มค่าความร้อนที่ลดลงตามช่วงอุณหภูมิของทั้งสองปฏิกรณ์ตั้งแต่ 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส

### 5.1.3.4 การวิเคราะห์ความหนืดมาตรฐาน ด้วยเครื่อง Rheometer ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและสกรูคู่

ค่าความหนืด ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีค่าเฉลี่ยของความหนืดต่ำกว่าปฏิกรณ์สกรูคู่ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.353 และ 0.354 ปาสคาลวินาที ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว มีค่าเฉลี่ยของความหนืดสูงกว่าปฏิกรณ์สกรูคู่

5.1.3.5 การวิเคราะห์จุดวาบไฟ (flash point) มาตรฐาน ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยว และสกรูคู่

ไม่สามารถหาจุดวาบไฟของน้ำมันชีวภาพได้ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถ แยกน้ำออกจากน้ำมันหนักหรือน้ำมันชีวภาพได้ เมื่อนำไปหาจุดวาบไฟเกิดการ ระเหย ความดันไอของน้ำจะยับยั้งไอสารระเหยในน้ำมันทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ ที่ช่วงอุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส

5.1.3.6 การวิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและ สกรูคู่

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวและ สกรูคู่มีค่า 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำมันชีวภาพทั้งสองแหล่งอยู่ใน สภาวะที่เป็นกรด และมีความเข้มข้นกว่าในส่วนของน้ำมันดิบหรือน้ำมันชีวภาพ ทั่วไป

5.1.3.7 การวิเคราะห์สภาพการกัดกร่อน (corrosivity) มาตรฐาน ในปฏิกรณ์สกรู เดี่ยวและสกรูคู่

ในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวพบค่าพบค่าการกัดกร่อนตรงกับมาตรฐาน 3a ตรง กับค่า Moderate corrosive ซึ่งมีค่าการกัดกร่อนค่อนข้างสูง ส่วนในปฏิกรณ์สกรู คู่ การกัดกร่อนตรงกับมาตรฐาน 1a ซึ่งทั้งสองขึ้นตรงกับค่า Slight tarnish ซึ่งมี ค่าการกัดกร่อนเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การกำจัดน้ำคาวด้วยการไฟโรไลซิสให้ได้ค่าผลได้ของน้ำมันชีวภาพเป็นการใช้ กระบวนการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดวิธีการหนึ่ง ซึ่งทำให้ เกิดผลผลิตด้านพลังงาน นำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ อีกทั้งเป็นการนำเอาวัชพืชไปกำจัดและ แปรรูป จึงหวังว่าในอนาคตหน่วยงานทหาร ทั้งโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ค่ายทหารต่างๆ มณฑลทหารต่างๆ ที่ประกอบด้วยพื้นที่ที่กว้างใหญ่ จะขจัดปัญหาดังกล่าวได้ในอนาคต โดยใน ปัจจุบันกองทัพไทยได้ทำการส่งเสริมการทำวิจัยด้านพลังงานทดแทนที่เกิดประโยชน์แก่กองทัพใน

ภาคส่วนต่างๆ ดังนั้นผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นดังกล่าวนี้จะได้สานต่อและเกิดการต่อยอดในการทำวิจัยให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้นต่อไป

5.2.2 การไพโรไลซิสของปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวมีอุณหภูมิการให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วปฏิกรณ์ ดังนั้น การประยุกต์ใช้สารเร่งปฏิกิริยา (catalyzes) เพื่อทำให้เกิดผลได้ของน้ำมันที่สูงและคุณภาพของน้ำมันที่ดีขึ้น จะเป็นสิ่งที่สำคัญและควรปฏิบัติเป็นอย่างยิ่ง แต่ต้องรีบดำเนินการเพราะเป็นเครื่องที่มีอายุการใช้งานเป็นระยะเวลานานมาแล้ว การที่จะได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพเกินกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ก็ต่อเมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม อย่างเช่น ซีโอไลต์ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ แก๊ส และความดันภายในระบบ ซึ่งโดยปกติการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์สกรูเดี่ยวจะได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพอยู่ในช่วง 25 – 35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการควบคุมสภาวะของปฏิกรณ์และการใช้สารเร่งปฏิกิริยา จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้ในการวิจัยในครั้งต่อไป

5.2.3 การไพโรไลซิสของปฏิกรณ์สกรูคู่ยังมีปัญหาติดขัดหลายประการ เนื่องจากเป็นเครื่องต้นแบบ จึงทำให้ค่าผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีความแปรปรวน ไม่แน่นอน เมื่อทำการเดินเครื่องในระยะเวลาที่แตกต่าง จะได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพและผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละครั้ง ดังนั้นเมื่อทำการรายงานผลการทดลองจึงใช้ค่าเฉลี่ยของผลได้ในกรณีนำเสนอเพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อน แต่เนื่องจากประสิทธิภาพโดยตรงจากสกรูคู่จึงทำให้สภาวะการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในสกรูคู่เกิดได้ดีกว่าสกรูเดี่ยว ทั้งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

5.2.4 การไพโรไลซิสของปฏิกรณ์สกรูคู่ต้องใช้เวลาในการเดินระบบเพื่อให้ความร้อนอย่างทั่วถึงภายในระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 3 – 7 ชั่วโมง ก่อนทำการป้อนชีวมวลสู่กระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจะทำได้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่สูงอย่างต่อเนื่อง ตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดประสิทธิภาพภายในระบบอย่างแท้จริง

5.2.5 ในทางวิศวกรรมการสร้างระบบปฏิบัติแบบต่อเนื่อง (unit operate) เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ทั้งทางวิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมสาขาอื่นๆ ดังนั้น การสร้างระบบเพื่อรองรับกระบวนการไพโรไลซิสจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ อย่างเช่น การตัดแต่งโมเลกุลของน้ำมันชีวภาพที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ด้วยการ creaking เพื่อทำให้โมเลกุลของสารดังกล่าวมีขนาดเล็กลง เหมาะต่อการเข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วนต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์. การคาร์บอนไนซ์แกลบในฟลูอิดไอดีเบด: วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- [2] เย็นหทัย แน่นหนา. **สเปกโทรสโกปี สำหรับเคมีอินทรีย์**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย พญาไท, 2549.
- [3] ศุภย์สังเสริมพลังงานชีวมวล. **เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซ  
ชีวภาพ**. 99/305 ถนนเทศบาลสงเคราะห์ แขวงจตุจักร เขตจตุจักร, 2549.
- [4] สินีนาฏ รอดจั้น. **ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไอดีเบดแบบ  
หมุนเวียน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] สุพจน์ แหวนเพชร. **การไพโรไลซิสของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง**.  
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- [6] Aho, A., DeMartini. N., Pranovich, A., Krogell. J., Kumar, N., Eränen, K., Holmbom.  
B., Salmi. T., Hupa. M. and D.Y. Murzin. Pyrolysis of pine and gasification of  
pine chars – Influence of organically bound metals. Bioresource  
Technology. 128 (2013) : 22-29.
- [7] Alencar, J.W., Alves, P.B. and A.A. Craveiro. Pyrolysis of tropical vegetable oil. J.  
Agric Food Chem. 31 (1983) :1266-1270.
- [8] Angin, D. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from  
pyrolysis of safflower seed press cake. Bioresource Technology. 128 (2013) :  
593-597.
- [9] Asadullah M, Rahman M.A, Ali M.M, Rahman M.S, and M.A, Motin. Production of  
bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. fuel Journal 86 (2007): 2514 –  
2520.
- [10] Ben, H., Mu, W., Deng, Y., and A.J. Ragauskas. Production of renewable gasoline  
from aqueous phase hydrogenation of lignin pyrolysis oil. Fuel, 103 (2013) :  
1148-1153.

- [11] Bilgen, S., Keles S. and K. Kaygusuz. **Calculation of higher and lower heating values and chemical exergy values of liquid products obtained from pyrolysis of hazelnut cupulae.** Energy 41 (2012) : 1-6.
- [12] Bridgwater, A.V., Carson, P. and M. Coulson. **A comparison of fast and slow pyrolysis liquids from malee.** Global Energy [J], Issues 2007, Vol. 27, No.2, PP: 204 - 216.
- [13] Butler, E., Devlin, G., Meier, D. and K. McDonnell. **Characterisation of spruce, salix, miscanthus and wheat straw for pyrolysis applications.** Bioresource Technology, Volume 131(2013) : 202-209.
- [14] Cardoso, C.R. and C.H. Ataíde. **Analytical pyrolysis of tobacco residue: Effect of temperature and inorganic additives.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 99 (2013) : 49-57.
- [15] Coulson, M., and A.V. Bridgewater. **Fast pyrolysis of annually harvested crops for bio energy applications.** Bio-Energy Research Group (2005), Aston University, Birmingham, United kingdom.
- [16] Demirbas A. **Pyrolysis of Biomass for Fuels and Chemicals.** Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Volume 31, (2009) : 1028 – 1037.
- [17] Duan. P. and P.E. Savage. **Upgrading of crude algal bio-oil in supercritical water.** Bioresource Technology. 102 (2011) : 1899-1906.
- [18] Gan, J., and W. Yuan. **Operating condition optimization of corncob hydrothermal conversion for bio-oil production.** Applied Energy, 103 (2013) : 350-357.
- [19] Gerçel, H.F. **Bio-oil production from *Onopordum acanthium* L. by slow pyrolysis.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 92 (2011) : 233-238.
- [20] Huang, Y., Kudo, S., Norinaga, K., Amaike, M., and J-I. Hayashi. **Selective production of light oil by biomass pyrolysis with feedstock-mediated recycling of heavy oil.** Energy & Fuels. 26 (2012) : 256-264.
- [21] Imam, T. and S. Capareda. **Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 93 (2012) : 170-177.



- [22] Ioannidou, O., Jung C.G. and A. Zabaniotou. **A thermogravimetric model to predict yield product distribution in pyrolysis of agricultural biomass.** *Catalysis Today* 167 (2011) : 129-134.
- [23] Kanaujia, P.K., Sharma. Y.K., Agrawal, U.C. and M.O. Garg. **Analytical approaches to characterizing pyrolysis oil from biomass.** *Trends in Analytical Chemistry.* 42 (2013) : 125-136.
- [24] Laird, D.A., Robert C. Brown, R.C, James E. Amonette, J.E, and J. Lehmann. **Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar.** *Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Volume 3, Issue 5, (2009) : 547–562.*
- [25] Lee, K-H., Kang, B-S., Park, Y-K and J-S. Kim. **Influence of reaction temperature, pre-treatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice strew by fast pyrolysis, using a fluidized bed.** *Energy & Fuels* 19 (2005): 2179-2184.
- [26] Li, H., Xu, Q Xue, H., and Y, Yan. **Catalytic reforming of the aqueous phase derived from fast pyrolysis of biomass.** *Renewable Energy Journal, (2009) : 1-6.*
- [27] Lu, Q., Yang, X-L. And X-F. Zhu. **Analysis on chemical and properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk.** *Journal Analytical and Applied Pyrolysis.* 82 (2008): 191-198.
- [28] Lu, Q. Li, W-Z. and X-F. Zhu. **Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils.** *Energy Conversion and Management.* 50 (2009) : 1376–1383.
- [29] Ludovic J. A. Capo-chichi, Wilson H. Faircloth, A. G. Williamson, Michael G. Patterson, James H. **Invasion Dynamics and Genotypic Diversity of Cogongrass (*Imperata cylindrica*) at the Point of Introduction in the Southeastern United States.** *Invasive Plant Science and Management* 1(2), (2008) : 133-141.
- [30] Ly, H.V., Jinsoo Kim, J. and S-S. Kim. **Pyrolysis characteristics and kinetics of palm fiber in a closed reactor.** *Renewable Energy.* 54 (2013) : 91-95.
- [31] Maniatis., K. and A., Buekens. **Fast pyrolysis of biomass A.V. Bridgewater and J.L.Kuester. Recsearch in thermochemical biomass conversion.** *Great Britain Science.* (1998): 179-189.

- [32] Mei-Kuei Lee, Wen-Tien Tsai, Yi-Lin Tsai, and L. Sheau-Horng. **Pyrolysis of napier grass in an induction-heating reactor** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 88 (2010) : 110 – 116.
- [33] Mortensen P.M., Grunwaldt J-D., Jensen. P.A., Knudsen. K.G. and A.D. Jensen. **A review of catalytic upgrading of bio-oil to engine fuels.** *Applied Catalysis A: General.* 407 (2011) : 1-19.
- [34] Mullen, C.A., and A. Boateng. **Chemical composition of bio-oil produced by fast pyrolysis of two energy crops.** *Energy fuel* (2008) 22 : 2104 - 2019.
- [35] Ohra-aho, T., Gomes, F.J.B., Colodette, J.L. and T. Tamminen. **TS/G ratio and lignin structure among Eucalyptus hybrids determined by Py-GC/MS and nitrobenzene oxidation.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, In Press, **Corrected Proof**, Available online 1 February 2013.
- [36] Promee, K., Vitidsant, T., Kaewrod, N., Um-Punyeun, T and S. Chareankit. **The synthesize Bio-Oil from Manila Grass transformed by Pyrolysis.** *Proceeding of the 2011 International conference on power science and Engineering*, Chengdu, China. 3 (2011): 765-772.
- [37] Putun A.E, Apayd E, and E. Putun. **Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis.** *Energy.* 29 (2004) : 2171 – 2180.
- [38] Sanchez-Silva, L., López-González, D., Garcia-Minguillan, A.M. and J.L. Valverde. **Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of Nannochloropsis gaditanamicroalgae.** *Bioresource Technology.* 130 (2013) : 321-331.
- [39] Schwab, A.W., Dybstrat, G.J., Selke, E. and E.H. Pryde. **Diesel fuel from thermal decomposition of soybean oil.** *JAOCS.* 65 (1988): 1781-1786.
- [40] Sensoz, S., Angin, D. and S. Yorgun. **Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica naous* L.): fuel properties of bio-oil.** *Biomass & Bioenergy.* 19 (2000) : 271-279.
- [41] Shafizadeh F. and P. S. Chin. 1977. **Thermal Deterioration of Wood.** *Wood Technology: Chemical Aspects.*, Chapter 5 (1977) : 57–81. *ACS Symposium Series, Vol. 43.*

- [42] Sorsa, R. and S. Soimakallio. Does bio-oil derived from logging residues in Finland meet the European Union greenhouse gas performance criteria?. *Energy Policy*. 53 (2013) : 257-266.
- [43] Su-Hwa Jung, Bo-Sung Kang. and K. Joo-Sik Kim. Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 82 (2008): 240–247
- [44] Tanaka, H., Putalum, W., Tsuzaki, C., Shoyama, Y., Seebauer, V., Petek, J. and G. Staudinger. Effect of particles size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetics by thermogravimetric analysis. *Fuel*. 76 (1997): 1277-1282.
- [45] Tessarolo N.S., Luciana R.M.dos Santos, Raphael S.F. Silva. and D. A. Azevedo. Chemical characterization of bio-oils using comprehensive two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1279 (2013) : 68-75.
- [46] Xianwen, D., Chuangzhi, W., Haibin, Li and C. Yong. The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB reactor. *Energy & Fuels*. 14 (2000): 552-557.
- [47] Xiao. R. and W. Yang. Influence of temperature on organic structure of biomass pyrolysis products. *Renewable Energy*. 50 (2013) : 136-141.
- [48] Ying, X., Tiejun, W., Longlong, M., and C. Guanyi. Upgrading of fast pyrolysis liquid fuel from biomass over  $\text{Ru}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  catalyst. *Energy conversion and management*. 55 (2012) : 172-177.
- [49] Zheng, Ji-lu., Yi, W-M. and W. Na-na. Bio-oil production from cotton stalk. *Energy Conversion and Management*. 49 (2008): 1742-1730.
- [50] Zheng, A., Zhao, Z., Chang, S., Huang, Z., Wang, X., He, F. and H. Li. Effect of torrefaction on structure and fast pyrolysis behavior of corncobs. *Bioresource Technology*, 128 (2013) : 370-377.
- [51] Zhou. S., Mourant, D., Lievens, C., Wang, Y., Li, C-Z and M. Garcia-Perez. Effect of sulfuric acid concentration on the yield and properties of the bio-oils obtained from the auger and fast pyrolysis of Douglas Fir. *Fuel*, 104 (2013) : 536–546.

**ภาคผนวก**

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

## การคำนวณ

## 1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว (Daf)} = 100 \times \left[ \frac{W_{Liq}}{W_{Daf}} \right]$$

## 2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง (Daf)} = 100 \times \left[ \frac{W_R}{W_{Daf}} \right]$$

## 3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (Daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว} - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย

$$W_{Daf} = \text{น้ำหนักของผักตบเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_R = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{Liq} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว}$$

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง

#### 1. การวิเคราะห์ของแข็งแบบประมาณ (Proximate Analysis: ASTM D 3173-D 3175)

##### 1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D 3173)

#### หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากของแข็ง ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งที่หายไป

#### เครื่องมือ

1. ตู้อบ
2. ถ้วยกระเบื้อง (Porcelain Crucible) พร้อมฝาปิด
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)

#### วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งคงที่) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

## การคำนวณ

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100$$

เมื่อ  $M$  = ร้อยละของปริมาณความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

**ปริมาณเถ้าในตัวอย่างของแข็ง** (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal : ASTM D 3174)

## หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากเผา

## เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

## วิธีการทดลอง

1. ปิดฝา และเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง (หรืออาจใช้ตัวอย่างของแข็งที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)
3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝา ค่อย ๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส เมาของแข็งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำถ้วยกระเบื้องและฝาดออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

#### การคำนวณ

$$A = \frac{(W_3 - W_4)}{W} \times 100$$

เมื่อ

A	=	ร้อยละของเถ้า
$W_3$	=	น้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝาและเถ้า (กรัม)
$W_4$	=	น้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝา (กรัม)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

### 1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D 3175 )

#### หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่หายไป

#### เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครุชิลทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น



### วิธีการทดลอง

1. เผาครุชิลเปิดพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝา บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิกเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิกเกิลพร้อมตัวอย่างของแข็งเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ของแข็งที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อนาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิกเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิกเกิลพร้อมฝาและของแข็งที่เหลือบันทึกผล

### การคำนวณ

$$V = \left( \left( \frac{W_5 - W_6}{W} \right) \times 100 \right) - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น
$W_5$	=	น้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็งก่อนเผา (กรัม)	
$W_6$	=	น้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็งหลังเผา (กรัม)	
W	=	น้ำหนักตัวอย่างของแข็งเริ่มต้น (กรัม)	

## 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างของแข็ง

### การคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = ร้อยละความชื้น – ร้อยละเถ้า – ร้อยละสารระเหย

## 2. การหาค่าความร้อนของของแข็ง (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter : ASTM D2015)

### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบ ๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

### เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก ( $C_6H_5COOH$ ) ควรได้รับมาตรฐานของ National Institute of Standard and Technology
3. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เมทิลเรด (Methyl Red) หรือเมทิลเพอเพิล (Methyl Purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 นอร์มัล (3.76 กรัมต่อลิตร) สารละลายนี้ปริมาตร 1 มิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี
6. น้ำล้างบอมบ์ ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์อิ่มตัว 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

## การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างของแข็งในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิประมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิกึ่งที่และต่ำกว่าอุณหภูมิจองห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิกึ่งที่
8. เมื่ออุณหภูมิกึ่งที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_i$ ) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุก ๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิกึ่งที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_f$ )
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อย ๆ ลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้

## 12. วัดความยาวหลอดที่เหลือน้ำมันที่กผล

## การคำนวณ

$$E = \frac{[(Hg) + e_1 + e_2]}{T}$$

เมื่อ

- $E$  = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จุลต่อองศาเซลเซียส)  
 $H$  = ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (จุลต่อกรัม)  
 $g$  = น้ำหนักกรดเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)  
 $e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 บีบียู  
 $e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (บีบียูต่อเซนติเมตร)  
 $T$  =  $T_f - T_i$  ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นของแข็งแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_v(\text{gross}) = \frac{[(TE) - e_1 - e_2 - e_3]}{g}$$

- เมื่อ  $Q_v(\text{gross})$  = ค่าความร้อนของของแข็ง (จุลต่อกรัม)  
 $T$  =  $T_f - T_i$  (องศาเซลเซียส)  
 $e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 จูล  
 $e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (จุลต่อเซนติเมตร)  
 $e_3$  =  $25 \times 10^3$  (จูล)  $\times$  รั้อยละกำมะถัน  $\times$  น้ำหนักของแข็งที่ใช้ (กรัม)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ร.อ.กิตติภาพ พรหมดี เกิดเมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2518 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี การศึกษา 2541 และสำเร็จการศึกษาในระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ในปีการศึกษา 2547 จากนั้นได้สอบบรรจุเข้า รับราชการราชการทหาร สังกัดกองทัพบก ในตำแหน่ง อาจารย์ กองวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (ร.ร.จปร.) ในปี พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาใน หลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2552