

กระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วของเศษไม้กระถินณรงค์ไปเป็นน้ำมันชีวภาพ



ปริญญานิพนธ์
ของ
ณิศาร นำเจริญพินิจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
พฤศจิกายน 2558

กระบวนการโฟโกลิซิสแบบเร็วของเศษไม้กระถินณรงค์ไปเป็นน้ำมันชีวภาพ



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
พฤศจิกายน 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กระบวนการโฟโกลิซิสแบบเร็วของเศษไม้กระถินณรงค์ไปเป็นน้ำมันชีวภาพ



บทคัดย่อ
ของ
ฉัตร นำเจริญพินิจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
พฤศจิกายน 2558

ณิศาร นำเจริญพินิจ .(2558). กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเศษไม้กระถินณรงค์ไปเป็นน้ำมันชีวภาพ. ปรียญานุพนธ์ วท .ม. (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผศ.ดร.วิชชากร จารุศิริ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจากเศษไม้กระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis Benth*) ไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องมีสกรูด้านล่าง โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 380-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 80-160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 1-5 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนชีวมวลโดยการปรับความเร็วรอบของสกรู 120-360 รอบต่อนาที ใช้การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม แบบ 2 ปัจจัย โดยการหาพื้นที่ผิวตอบสนองที่ให้ภาวะที่เหมาะสมของการเกิดน้ำมันชีวภาพสูงสุดตามวิธีการ แบบบล็อกซ์-เบนเคน ผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 1 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนเศษไม้ 120 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ค่าการเลี้ยวเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพและกากยางเหนียว เท่ากับ 51.87%, 46.32% และ 5.55%โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทมิเตอร์ เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และโปรตอน -นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี พบว่ามีองค์ประกอบเป็นฟีนอล คีโตน และแอลดีไฮด์ หาค่าความเป็นกรดโดยเครื่องไทเทรชันแบบอัตโนมัติ ให้ค่าความเป็นกรด 105.72 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม



FAST PYROLYSIS OF BLACK WATTLE RESIDUALS TO BIO-OIL



AN ABSTRACT
BY
NISATORN NUMCHAROENPINIJ

Present in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Science Degree in Environmental Technology and Resource management
At Srinakharinwirot University
November 2015

Nisatorn Numcharoenpinij. (2015). *Fast Pyrolysis of Black Wattle residuals to Bio-oil*. Master Thesis, M.Sc. (Environmental Technology and Resource management). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.
Advisor Committee: Dr. Witchakorn Charusiri

The research aims to study fast pyrolysis of black wattle (*Acacia auriculiformis Benth*) residues to bio-oil yield which was performed in underscrewing continuous pyrolytic reactor under the condition as following; temperature of 380-450°C, feed rate of biomass residue of 120-360 rpm, flow rate of nitrogen gas of 80-160 cm³/min and 1-5 %wt of magnesium oxide catalyst the 2 level factorial design and the response surface methodology (RSM) which using Box-Behnken design of experiment were implimentea to optimize the appropriate condition which indicated that the highest yield of bio-oil fraction was obtained. The result found that the highest liquid yield and bio-oil fraction was 51.87%wt and 46.32%wt respectively whereas tar fraction was about 5.55%wt at the condition of temperature of 450 °C, nitrogen flow rate of 160 cm³/min, MgO catalyst of 1%wt and feed rate of biomass residue of 120 rpm. Physicochemical and fuel properties were obtained from the GC-MS, FT-IR and H¹-NMR analysis of bio-oil fraction at optimum was carried out. The composition of bio-oil was also mainly an oxygenated compound with high molecular weight consisting of phenol, ketone and aldehyde as well, whereas the acidity was 105.72 mg-KOH/g.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
กระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วของเศษไม้กระถินณรงค์ไปเป็นน้ำมันชีวภาพ
ของ
ณิศาร นำเจริญพินิจ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดุษฎี โยเหลา)
วันที่ เดือน พ.ศ. 2558

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรินท์ งามนิยม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

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

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทุ่มเททั้งร่างกายแรงใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความร่วมมือ และคำแนะนำจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงาน จึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ธารพงษ์ วิทิตสานต์ รองอธิการบดีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัยในเรื่องการผลิตน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลประเภทต่างๆ และเป็นผู้สร้างแรงบันดาลใจในการทำวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้รับ ความกรุณา แนะนำ และให้คำปรึกษาอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ได้ให้ความกรุณาชี้แนะประเด็นต่างๆ ให้ปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของคณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ ที่ให้ความดูแลและคอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีทั้งด้านระบบการเรียน และสนับสนุนการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ที่มอบทุนสนับสนุนเพื่อทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ควมอนุเคราะห์ อุปกรณ์ เครื่องมือ และบุคลากรศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกของสถานที่สำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจอยู่เสมอ

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้อาการกำลังใจที่ดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำปริญญานิพนธ์

ณิศาธร นำเจริญพินิจ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
กรอบแนวความคิด.....	3
กรอบการวิจัย.....	3
ขอบเขตงานวิจัย.....	4
ขั้นตอนการทดลอง.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
แนวคิดและทฤษฎี.....	6
ชีวมวล.....	8
การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง.....	16
กระถินณรงค์.....	16
การแปรรูปพลังงานชีวมวล.....	17
กระบวนการไพโรไลซิส.....	19
น้ำมันชีวภาพ.....	26
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการทดลอง.....	31
เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	31
สารตั้งต้นและสารเคมี.....	32
ขั้นตอนการทดลอง.....	32
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	36
การวิเคราะห์สมบัติเศษไม้กระถินณรงค์.....	36
สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	38
ร้อยละผลได้ของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	40
อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิสของเศษไม้กระถินณรงค์.....	48
ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพที่สภาวะเหมาะสม.....	51
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ.....	54
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ.....	55

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
สรุปผลการทดลอง.....	63
ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	69
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	95



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 การผลิตพลังงานในประเทศไทยปี 2556.....	6
2 การนำเข้าพลังงานในประเทศไทยปี 2556.....	7
3 สัดส่วนการเปลี่ยนเป็นชีวมวล.....	13
4 ศักยภาพพลังงานชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทย ปี 2552.....	15
5 เปรียบเทียบการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง.....	16
6 รูปแบบและปัจจัยของกระบวนการไพโรไลซิส.....	19
7 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	26
8 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ จากเศษไม้กระถินณรงค์.....	33
9 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบนเคน.....	33
10 การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ.....	36
11 ส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักของเศษไม้กระถินณรงค์.....	38
12 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	38
13 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	39
14 ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเศษไม้กระถินณรงค์.....	40
15 การวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองด้วยสมการ 2FI.....	46
16 ขอบเขตการหาสภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลอง แบบบล็อกซ์-เบนเคนของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์ โดยการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง.....	52
17 สภาวะที่เหมาะสมได้จากการคำนวณของโปรแกรม design expert ของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์จากการไพโรไลซิส แบบต่อเนื่อง.....	52
18 สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์ จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง.....	53
19 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ.....	54
20 องค์ประกอบของน้ำมันเบา.....	56
21 องค์ประกอบของน้ำมันหนัก.....	57
22. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี (H^1 -NMR)	61
23 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ.....	62

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวความคิด.....	3
2 กรอบการวิจัย.....	3
3 สัดส่วนการผลิตพลังงานในประเทศไทยปี 2556.....	7
4 สัดส่วนการนำเข้าพลังงานในประเทศไทยปี 2556.....	8
5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	10
6 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส.....	10
7 โครงสร้างโมเลกุลลิกนิน.....	11
8 เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานชีวมวล.....	17
9 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบพองอากาศ.....	20
10 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบไหลเวียนและเบดแบบถ่ายโอน.....	21
11 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบแอบลาทิป.....	21
12 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน.....	22
13 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบสุญญากาศ.....	22
14 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	31
15 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	32
16 การแตกสลายเชิงความร้อนของเศษไม้กระถินณรงค์.....	37
17 ลักษณะแมกนีเซียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	39
18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Normal % Probability พลอตกับ Internally Studentized Residuals.....	44
19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Predicted พลอตกับ Actual.....	44
20 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Internally Studentized Residuals พลอตกับ Predicted.....	45
21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Internally Studentized Residuals พลอตกับ Run Number.....	45
22 การแปลงข้อมูลแบบบ็อกซ์คอกซ์.....	46
23 การพลอตแบบคอนทัวร์.....	47
24 แผนภูมิสามมิติของสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ จากการไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเศษไม้กระถินณรงค์.....	48
25 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของอุณหภูมิ 380 415 และ 450 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที.....	48

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
26 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 80 120 และ 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที.....	49
27 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของ ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที.....	50
28 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของอัตราการป้อนสาร 120 240 และ 360 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก.....	51
29 ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบา.....	53
30 โคโรมาโตแกรมน้ำมันเบาจากเศษไม้กระถินณรงค์.....	55
31 โคโรมาโตแกรมน้ำมันหนักจากเศษไม้กระถินณรงค์.....	56
32 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (FT-IR)	60
33 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์ด้วย เทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (^1H -NMR)	60

บทที่ 1

บทนำ

ประเทศไทยมีแนวโน้มพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการเติบโตทางเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศให้เป็นอุตสาหกรรมการผลิตมากขึ้น ผลของการเติบโตดังกล่าว ทำให้ภาคการผลิต อุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่งมีความต้องการการใช้พลังงานมากขึ้น โดยปัจจุบันอาศัยพลังงานจาก น้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลและมีปริมาณสำรอง ในปริมาณจำกัด ซึ่งคาดว่าจะมีใช้ได้อีกในระยะเวลาอันสั้น โดยหากยังไม่สามารถค้นพบพลังงานใหม่หรือมี การอนุรักษ์พลังงานอย่างจริงจัง ประเทศไทยอาจต้องประสบกับวิกฤตการณ์พลังงาน เช่น ในปีพ.ศ.2516 และพ.ศ.2523 ซึ่งทำให้ภาคการผลิตและการบริโภคชะลอตัว เกิดการขาดแคลนพลังงาน และมีแนวโน้มลดน้อยลงเรื่อยๆ เพื่อเป็นการบรรเทาผลกระทบจากวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานที่อาจเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องแสวงหาแหล่งเชื้อเพลิงอื่นมาทดแทน เพื่อชะลอการหมดไปของเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ และ ตอบสนองความต้องการการใช้พลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการในปัจจุบัน

ในขณะที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรอุตสาหกรรม มีกา รแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมากมาย เช่น ข้าว มันสำปะหลัง มันฝรั่ง น้ำมันปาล์ม ฯลฯ ซึ่งนอกจากเป็นผลผลิตทางการเกษตร เพื่อสร้างรายได้ให้แก่ประเทศ การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร เหล่านั้น จะให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือชีวมวลเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกษตรกรหรือชาวบ้าน มักเผาทิ้งตามไร่นา ไม่ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งมลพิษทางอากาศ ทำให้ดินเสีย รวมถึงเป็นการใช้ทรัพยากร อย่างไม่รู้คุณค่า ปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาพลังงานทดแทนจากพืชหรือของเสีย โดยพบว่าชีวมวลสามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เป็น เชื้อเพลิงที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงมีความพยายามศึกษาวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนจากพืชให้เป็นพลังงาน ที่มีศักยภาพสำหรับแก้ไข วิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานในปัจจุบัน และเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับ เป็นแหล่งพลังงานในอนาคต

การพัฒนาพลังงานทดแทนจากพืชพลังงานหรือชีวมวลได้รับความสนใจจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง จึงได้มีการสนับสนุนการปลูกไม้โตเร็ว เพื่อแปรรูปเป็นพลังงาน นำ มาใช้ประโยชน์ในด้ วยพลังงานและเชื้อเพลิง โดยเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงมีหลายรูปแบบ (วรณูช แจ่มสว่าง. 2551: 124) ทั้งกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางชีวเคมี และกระบวนการทางเคมีความร้อน ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) ให้ความร้อน การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือ แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) กระบวนการทำให้เป็นของเหลว หรือลิกวิฟแฟกชัน (liquefaction) และการไพโรไลซิส (pyrolysis) โดยกระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการที่นำสารอินทรีย์มาผ่านการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยตรง ในสภาวะไร้ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 เป็นของเหลวเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) และกากยางเหนียว (tar) รวมทั้งของแข็งหรือถ่านชาร์ (char) และแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ซึ่งล้วนแต่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ในหลายรูปแบบ จึงเป็นแนวความคิดที่จะพัฒนาพลังงานทดแทนจากพืชและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

กระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis* Benth) หรือ Black Wattle จัดว่าเป็นไม้โตเร็วที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ทำเครื่องเรือน

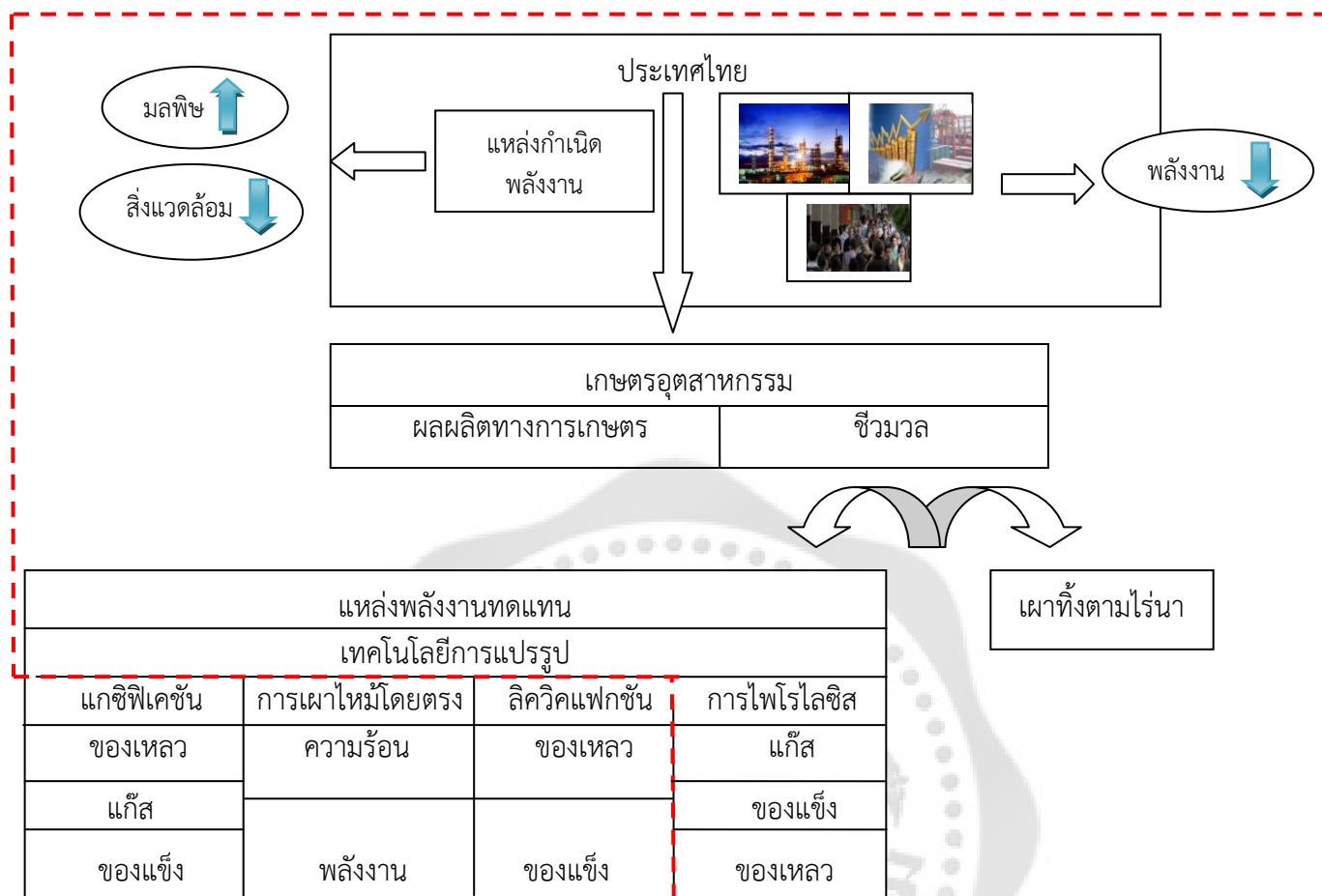
เยื่อกระดาษ และเชื้อเพลิง มีลักษณะโดยทั่วไปคือ เป็นไม้ต้นขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ไม้ไม่ผลัดใบ มีใบกล้า เป็นแบบขนนกสองชั้น เมื่อโตขึ้นจะมีการเรียงสลับถี่และห่างเป็นระยะของแผ่นใบ มีดอกสีเหลือง ออกเป็น ช่อแยกแขนงเป็นคู่ๆ ซึ่งกระถินณรงค์เป็นพืชที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี มีการ ปลุกและดูแลรักษาได้ง่าย สามารถตรึงไนโตรเจนได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ทนต่อ อากาศแห้งแล้งและ น้ำท่วมขัง สามารถขึ้นได้ดีในสภาพดินที่มีความเป็นกรดสูง (pH 4.2) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ ไม้ กระถินณรงค์กับไม้โตเร็วประเภทอื่นๆ เช่น ยูคาลิปตัส พบว่ายูคาลิปตัสจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้ง ทำให้คุณภาพของดินเสื่อมโทรม และสูญเสียความสมดุลของธาตุอาหารในดินความหลากหลายทางชีวภาพ ของสิ่งมีชีวิตหน้าดินมีแนวโน้มลดลง มีผลต่อจำนวนและชนิดของแมลงที่อาศัยกับพืชน้ำ ส่งผลให้ระบบ นิเวศเสียสมดุล โดยมีงานวิจัยที่สนับสนุนผลการทดลองว่าเมื่อนำยูคาลิปตัสมาผลิต เป็นน้ำมันชีวภาพด้วย กระบวนการไพโรไลซิส (Carlos Amen-Chen; et al. 1997: 32; Jan-Ems Joubert. 2013; และ มะลิวัลย์ หุทัยธนาสันต์; และคนอื่นๆ. 2553: 586) จะให้กากยางเหนียวที่สูง ก่อให้เกิดความสกปรกใน ห้องเผาไหม้ และส่งผลให้เกิดความเสียหายของเครื่องยนต์ นอกจากนี้มีสภาพความเป็นกรด ที่ยังส่งผลต่อ การกัดกร่อนของเครื่องยนต์ และก่อให้เกิดการอุดตันในอุปกรณ์ต่างๆ ในขณะที่กระถินณรงค์เป็นไม้โตเร็ว ประเภทหนึ่งที่ได้โตได้ดีในแถบ ร้อนชื้น มีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและ อุตสาหกรรมผลิตพลังงานความร้อนร่วมชีวมวล หรือวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษที่ใช้ไม้ กระถินณรงค์ ให้ค่าความร้อนของเศษไม้สูงและมีความชื้นต่ำ สามารถแปรรูปเป็นพลังงานได้ด้วยเทคโนโลยี กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยความร้อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ได้ ผลิตภัณฑ์หลักเป็นน้ำมันชีวภาพ ที่มีลักษณะเหลวเหนียวหนืดสีน้ำตาลเข้ม ผลผลิตที่ได้คล้ายน้ำมันดิบจาก ฟอสซิล ซึ่งมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน กากยางเหนียว และองค์ประกอบที่สามารถนำไปใช้เป็น สารเคมี เช่น ฟีนอล คีโตน เป็นต้น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ทั้งเป็นเชื้อเพลิงให้กับ ระบบ ผลิตไฟฟ้าแบบกังหันแก๊ส หรือแบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงแบบผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำกระถินณรงค์ ซึ่งเป็นพืชที่ปลูกในท้องถิ่นทั่วไป และเศษไม้ กระถินณรงค์มักไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์อื่น มาแปรรูปโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสให้ได้เป็นน้ำมันชีวภาพ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้น้ำมันชีวภาพสูง กากยางเหนียวต่ำ และมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง ใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้ในปัจจุบัน และเป็นแนวทางในการพัฒนา พลังงานที่ยั่งยืนสำหรับประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

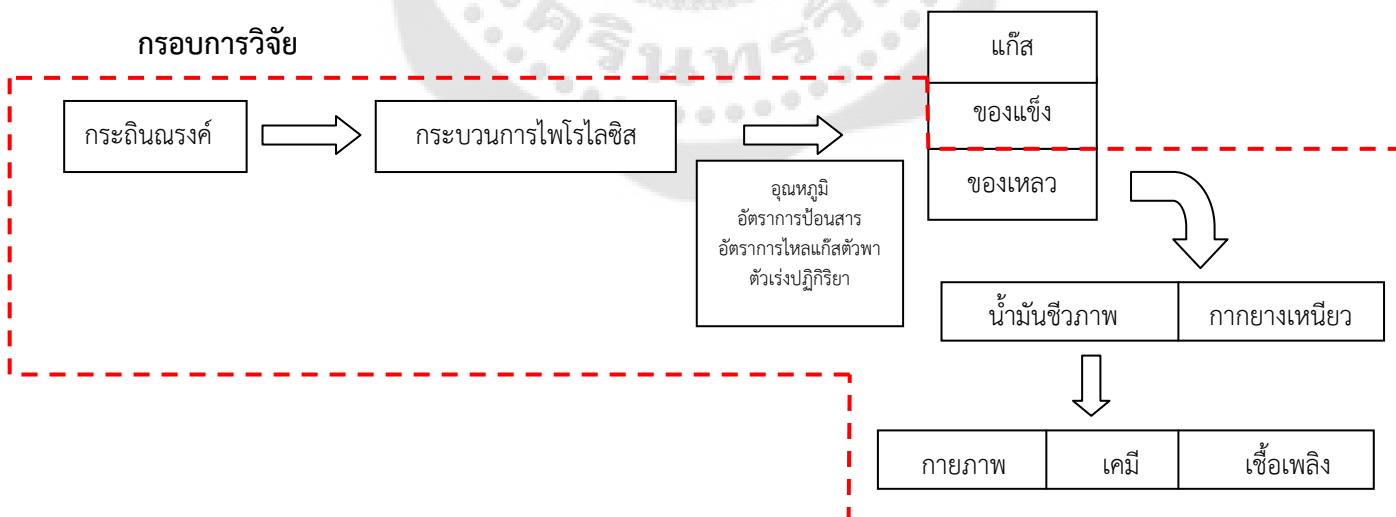
1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิสกระถินณรงค์ให้เป็นน้ำมันชีวภาพที่มีองค์ประกอบทางเคมี ทางกายภาพ และสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันชีวภาพและกากยางเหนียวที่แปรรูป จากกระบวนการไพโรไลซิสของกระถินณรงค์

กรอบแนวความคิด



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวความคิด

กรอบการวิจัย



ภาพประกอบ 2 กรอบการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัย

1. กำหนดปัจจัยสำหรับการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสาร สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสของ เศษไม้กระถินณรงค์บนเครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง
2. ออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมแบบบ็อกซ์-เบนเคน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูป น้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางเชื้อเพลิง ของน้ำมันชีวภาพและเสนอแนะแนวทางการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

ขั้นตอนการทดลอง

1. สืบค้นข้อมูล และงานที่เกี่ยวข้อง
2. นำกระถินณรงค์มาบดอนุภาค และอบด้วยความร้อนเพื่อลดความชื้นก่อนทำการทดลอง
3. วิเคราะห์องค์ประกอบของกระถินณรงค์ก่อนการทดลอง
 - ศึกษาอุณหภูมิที่สภาวะเริ่มต้นในการสลายตัวทางความร้อนของกระถินณรงค์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกโดยใช้เครื่องมือ Thermogravimetric Analyzer (TGA)
 - ทำการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis)
4. ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken design)
5. ทำการทดลองตามสภาวะที่ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ -เบนเคน โดยใช้วิธีการสุ่มลำดับการทดลอง โดยการนำเศษไม้กระถินณรงค์ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ แบบสกรูด้านล่าง ตามตัวแปรที่กำหนดไว้ทั้งอุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสาร
6. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ ไปสกัดแยกชั้นน้ำมัน และชั้นน้ำ จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และองค์ประกอบทางเชื้อเพลิง
7. วิเคราะห์ร้อยละผลได้ % (yield) และร้อยละการเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ % (selectivity) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่มีค่าที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมทางสถิติ design expert เวอร์ชัน 7.0.1 และหาค่าความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแปรรูปเป็นน้ำมันชีวภาพในปริมาณที่มากที่สุด และให้ร้อยละของสมบัติทางเชื้อเพลิงดีที่สุด
8. วิเคราะห์ผลที่ได้จากผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ
 - ศึกษาสารประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วยการใช้เครื่องมือ gas chromatography – mass spectrometry เป็นเครื่องที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง gas chromatography หอองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง และอีกส่วนของเครื่อง mass spectrometry บอองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นไปได้
 - ศึกษาองค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ โดยใช้ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธเคมีในโมเลกุล โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน เป็นการยืนยันว่าผลิตภัณฑ์มีหมู่ใดบ้าง
 - การวิเคราะห์จำนวนโปรตอนในโครงสร้างพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ (^1H -NMR)

- วิเคราะห์ความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพ

9. เปรียบเทียบผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design expert เวอร์ชัน 7.0.1 ที่คำนวณสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพในปริมาณสูงสุด และร้อยละของสมบัติของเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด กับการทดลองจริง

10. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการไฟโรไลซิสของกระถินณรงค์ให้เป็นน้ำมันชีวภาพที่มีองค์ประกอบทางเคมีทางกายภาพ และสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด

2. ทราบองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันชีวภาพและกาวยางเหนียวที่แปรรูปจากกระบวนการไฟโรไลซิสของกระถินณรงค์ เพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีแนวโน้มในการขยายตัวทางเศรษฐกิจ จึงมีความต้องการการใช้ ทรัพยากรพลังงานมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อตอบสนองภาคอุตสาหกรรมการผลิต และภาคคมนาคมขนส่ง โดยในปี 2556 มีการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและภาคคมนาคมขนส่งคิดเป็นร้อยละ 37 และร้อยละ 38 ของการใช้พลังงานทั้งประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน. 2556: ออนไลน์) ในขณะที่ต้องการพัฒนาแหล่งพลังงานในประเทศที่มีทรัพยากรในปริมาณจำกัด ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันดิบได้เพียง 2.1 แสนบาร์เรลต่อวัน แต่มีความต้องการใช้พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบสูงถึง 8 แสนบาร์เรลต่อวัน ปริมาณสำรองแก๊สธรรมชาติในประเทศไทยสามารถใช้ไปได้อีกไม่เกิน 20 ปีตามอัตราการใช้ในปัจจุบัน ทำให้เกิดผลกระทบวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงาน ต้องพึ่งพิงการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ในปริมาณที่สูงมาก (มนูญ ศิริวรรณ . 2555: 11) ซึ่งสถานการณ์การผลิตพลังงานและการนำเข้าพลังงานในประเทศไทยปี 2556 แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความเสี่ยงในความมั่นคงทางด้านพลังงานสูงมาก (ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์. 2556: 2) แสดงในตาราง 1 และ 2 และภาพประกอบ 3 และ 4

ตาราง 1 การผลิตพลังงานในประเทศไทยปี 2556****

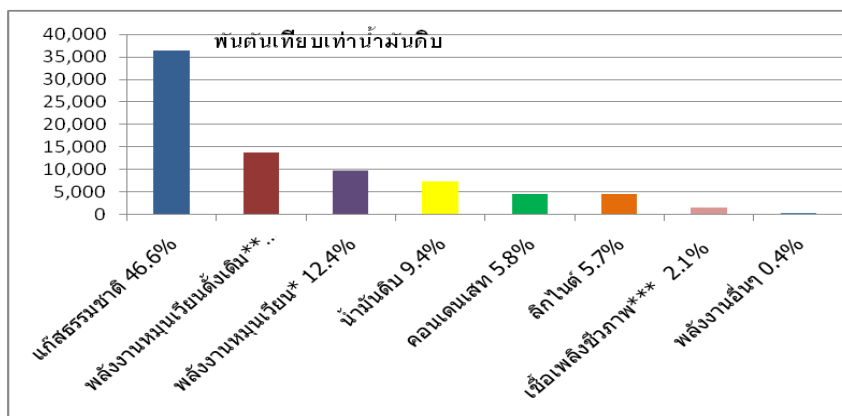
การผลิตพลังงาน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)			อัตราการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	
	2554	2555	2556****	2555	2556****
การผลิตพลังงานรวม	70,143	74,639	78,007	6.4	4.6
● พลังงานเชิงพาณิชย์	48,344	52,704	52,736	9.0	0.1
- น้ำมันดิบ	6,859	7,444	7,363	8.5	(1.1)
- ลิกไนต์	5,992	7,454	4,459	(20.7)	(6.2)
- แก๊สธรรมชาติ	31,310	36,006	36,405	15.0	1.1
- คอนเดนเสท	4,183	4,500	4,509	7.6	0.2
● พลังงานหมุนเวียน*	6,623	8,785	9,709	32.6	10.5
● พลังงานหมุนเวียน ดั้งเดิม**	14,045	11,751	13,739	(16.3)	16.9
● เชื้อเพลิงชีวภาพ***	919	1,259	1,609	37.0	27.8
● พลังงานอื่นๆ	212	140	284	(34.0)	102.9

* ประกอบด้วย แสงอาทิตย์(ความร้อน) แสงอาทิตย์(ไฟฟ้า) ลม พลังน้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พิน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ขยะ และแก๊สชีวภาพ

** ประกอบด้วย พิน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

*** ประกอบด้วย เอทานอล และไบโอดีเซล

**** คือ ประมาณการ ณ ปี 2556



ภาพประกอบ 3 สัดส่วนการผลิตพลังงานในประเทศไทยปี 2556****

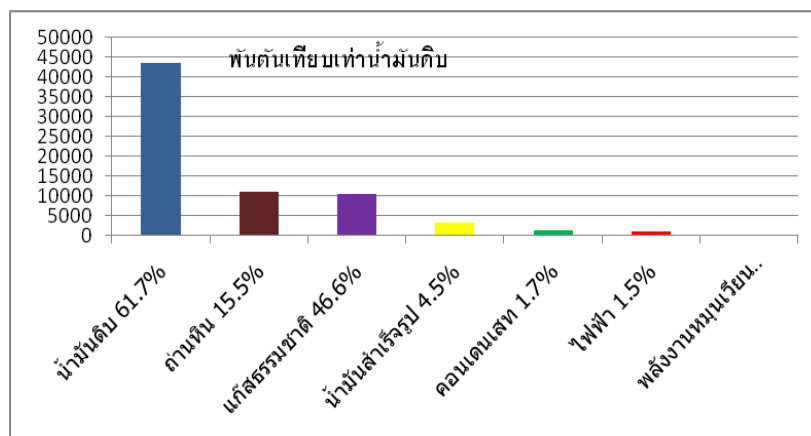
ที่มา: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน . (2556). สถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2556. หน้า 2.

ตาราง 2 การนำเข้าพลังงานในประเทศไทยปี 2556 ****

การนำเข้าพลังงาน	ปริมาณ (พีดัดนเทียบเท่าน้ำมันดิบ)			อัตราการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	
	2554	2555	2556****	2555	2556****
การผลิตพลังงานรวม	64,473	69,963	70,232	8.5	0.4
● พลังงานเชิงพาณิชย์	64,394	69,868	70,107	8.5	0.3
- น้ำมันดิบ	39,637	43,048	43,322	8.6	0.6
- ถ่านหิน	10,402	11,642	10,852	11.9	(6.8)
- น้ำมันสำเร็จรูป	2,071	2,881	3,186	39.1	10.6
- แก๊สธรรมชาติ	9,744	9,951	10,470	2.1	5.2
- คอนเดนเสท	1,630	1,466	1,206	(10.1)	(17.7)
- ไฟฟ้า	910	880	1,071	(3.3)	21.7
● พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม*	79	95	125	20.3	31.6

* ประกอบด้วย ฟืน และถ่าน

**** คือ ปริมาณการ ผลิต ปี 2556



ภาพประกอบ 4 สัดส่วนการนำเ้าพลังงานในประเทศไทยปี 2556 ****

ที่มา: ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน . (2556). *สถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2556*. หน้า 2.

ดังนั้นเพื่อลดปัจจัยเสี่ยงด้านพลังงานในประเทศ จากวิกฤตการณ์การขาดแคลนพลังงาน และเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้พลังงานให้เพียงพอในปัจจุบัน จำเป็นต้องมีการสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงาน โดยการเน้นเรื่องประสิทธิภาพของการใช้และศักยภาพของพลังงาน จากการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทนในปัจจุบัน มีการนำชีวมวลจากพืชมาแปรรูปเป็นพลังงาน พบว่า สามารถเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น น้ำมันชีวภาพ ไบโอดีเซล ดังนั้นความเป็นเกษตรอุตสาหกรรมของประเทศ ที่มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และได้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือชีวมวล ทั้งปริมาณผลผลิตทางการเกษตร จากการเพิ่มจำนวนพื้นที่เพาะปลูก และการพัฒนาเทคโนโลยีทางการเกษตร จึงทำให้ชีวมวลในประเทศไทยในอนาคตมีแนวโน้มผลิตเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงสมัยใหม่ ซึ่งเป็นปัญหาเนื่องจากเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลต่อสภาวะเรือนกระจก จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จึงทำให้ในปัจจุบันมีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสูงขึ้น เนื่องจากเป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ และมีต้นทุนของราคาชีวมวลที่ไม่แพง

2.2 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลมาจากคำว่า “ชีวะ” คือ สิ่งมีชีวิต ได้แก่ คน พืช และสัตว์ ในขณะที่ “มวล” คือ สิ่งของหรือวัตถุ ดังนั้นคำว่าชีวมวล หมายถึง อินทรีย์สารที่เกิดจากการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ทั้งสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กๆ พืช และสัตว์ ประกอบด้วยผลผลิตทางการเกษตร หรือกระบวนการการผลิตพืชผลทางการเกษตร เช่น พางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น และสิ่งเหลือทิ้งทางการเกษตร อีกทั้งชีวมวล เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน โดยพืชใช้แสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสง และกระบวนการการเจริญเติบโต จึงทำให้พืชสามารถเปลี่ยนรูปได้ทั้งของแข็ง เช่น ต้นอ้อย เศษไม้ หรือเปลี่ยนเป็นของเหลว เช่น ยาง น้ำมันดีเซล และเอทานอล ซึ่งสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เป็นพลังงานความร้อนได้

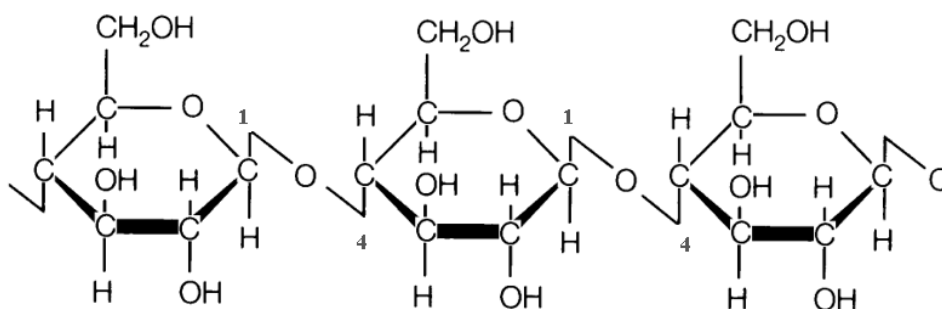
(Energy for Environment Foundation. 2008: 1-2)

ชีวมวลที่ได้จากพืชสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. ชีวมวลจากอุตสาหกรรมจากกระบวนการการผลิตทางการเกษตร เช่น
 - แกลบข้าวจากโรงสีข้าว
 - เศษไม้ ขี้เลื่อย และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากโรงเลื่อยและอุตสาหกรรมเครื่องเรือนจากไม้
 - ชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล
 - เส้นใยปาล์มจากโรงงานน้ำมันปาล์ม
 - เปลือกมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง
2. ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรจากนาข้าว ไร่นา และทุ่งหญ้า เช่น
 - ฟางข้าวจากนาข้าว
 - ใบอ้อยจากไร่อ้อย
 - ชังข้าวโพดจากไร่ข้าวโพด
3. ชีวมวลสำหรับการผลิตพลังงาน เช่น
 - ไม้โตเร็ว เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า
 - ปาล์มน้ำมัน เพื่อผลิตไบโอดีเซล

2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล

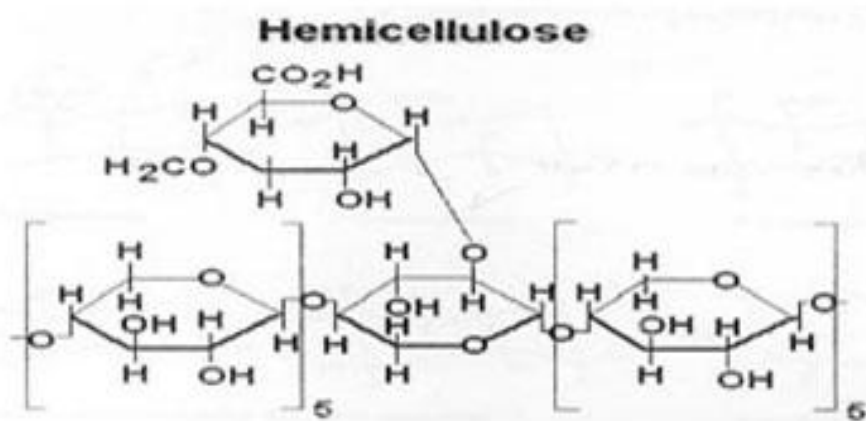
เซลลูโลส (cellulose) พบมากในผนังเซลล์ของพืชที่มีกลูโคสเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อกลูโคสแต่ละโมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกหลายโมเลกุลในกระบวนการ polymerization จะได้สารที่เรียกว่า “พอลิเมอร์” โดยมีการจับตัวกันของกลูโคสเป็นเส้นตรง จึงทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่ง เมื่อพอลิเมอร์แต่ละสายมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจำนวนตั้งแต่ 8000-15000 สาย จะได้สารที่เรียกว่า “cellulose molecule” และเมื่อ cellulose molecule หลายโมเลกุลมารวมกันจะได้สารที่เรียกว่า “Fiber” ซึ่งเป็นองค์ประกอบใหญ่ที่สุดของผนังเซลล์ เซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำหรือในสารละลายทั่วไป เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง แต่สามารถละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดและเบสมากได้ เช่น H_2SO_4 มีความเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ H_3PO_4 มีความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ และ HCl มีความเข้มข้น 41 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น (Rolando Zanzi Vigouroux. 2001: 3-4) แสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส

ที่มา: <http://www.greenspirit.org.uk/Resources/cellulose.gif>

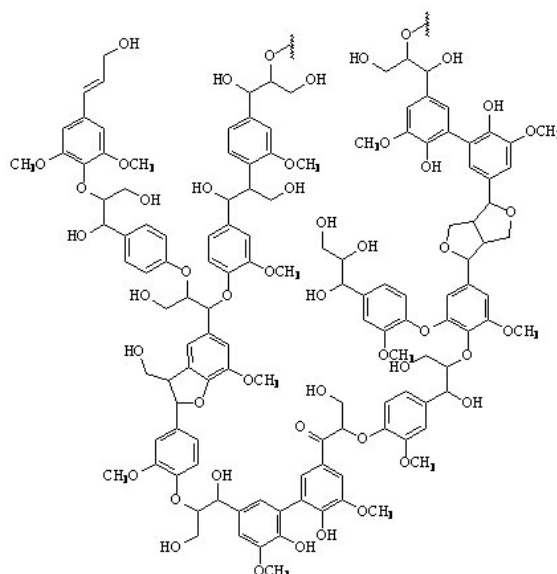
เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ พบในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด มีลักษณะทั้งสายโซ่ตรงและโซ่กิ่ง ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส แมนโนส และกาแลคโตส เป็นต้น องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลไซโลส (xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) (สุนทร สุทธิบาท. 2555: 6-7) แสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php

ลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำ หนักโมเลกุลสูง มักอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่ผนังเซลล์ทุติยภูมิของพืช มีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นองค์ประกอบย่อย ลิกนินเป็นสารอะโรมาติกที่ไม่ละลายน้ำ และไม่ยืดหยุ่น ส่งผลให้พืชที่มีสารชนิดนี้มาก จะมีความทนทานสูง อีกทั้งเป็นพอลิเมอร์ของฟีนิลโพรเพนที่ประกอบด้วยกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิล เมทอกซิล และหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ โดยมีฟีนอลิกไฮดรอกซิล จำนวนหนึ่งที่มีอยู่อย่างอิสระออกจากกลุ่มมีการ เชื่อมต่อกับฟีนิลโพรเพน ซึ่งเชื่อมต่อกับพันธะ C-C และ C-O-C ดังนั้นโครงสร้างของลิกนินจึงมีความซับซ้อนมาก โดย จะเปลี่ยนแปลงไปตามความแตกต่างของชนิดเชื้อเพลิงชีวมวล (สุนทร สุทธิบาท. 2555: 7) แสดงในภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน

ที่มา: www.research.uky.edu/green_energy.html

2.2.2 ส่วนประกอบของชีวมวล

โดยทั่วไปองค์ประกอบและสสารของชีวมวล สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ (สุพจน์ แหวนเพชร. 2552: 22-23) ได้แก่

2.2.2.1 ความชื้น (moisture)

เป็นปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล ส่วนมากเป็นผลผลิตจากการเกษตร จึงทำให้มีความชื้นค่อนข้างสูง เมื่อต้องการนำชีวมวลมาเผาไหม้ให้เกิดพลังงาน และมีความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์

2.2.2.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible substance)

สามารถจำแนกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ระเหยลุกเผาไหม้ได้ง่าย (volatiles matter) มีค่าระเหยสูง ลุกไหม้ได้ง่าย ทำให้มีการติดไฟได้ดี และ ส่วนที่เผาไหม้ยาก (fixed carbon) เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่ในรูปของแข็ง

2.2.2.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ อยู่ในรูปของขี้เถ้า (ash)

ขี้เถ้าในชีวมวลมีประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าวมีขี้เถ้าประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลกระทบต่อการใช้เผาไหม้ รวมถึงการรวบรวมเพื่อนำไปกำจัด

2.2.3 โครงสร้างทางกายภาพ

เชื้อเพลิงมีหลากหลายรูปแบบ ทั้งรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ โดยทั่วไปชีวมวลมีลักษณะเป็นของแข็งเหมือน ถ่านหิน แต่มีความแตกต่างของโครงสร้างตามประเภทของชีวมวล นอกจากนี้ความชื้น และสารเจือปนถือเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชีวมวลแต่ละชนิด (Energy for Environment Foundation. 2008: 4-5)

ขนาดและรูปร่าง ส่วนประกอบหลักของชีวมวลจากพืชมีความหลากหลายทั้งขนาดและโครงสร้าง เช่น ข้าวเปลือกมีขนาดไม่เกิน 1 เซนติเมตร แพนไม้จากโรงเลื่อยมีขนาดประมาณ 1 เมตร และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมีขนาดยาวประมาณ 10-20 เซนติเมตร เป็นต้น

ความชื้น ชีวมวลสดจะประกอบด้วยความชื้นสูง เช่น ไม้สดมีความชื้น 50-60 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยปาล์มมีความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ และซังข้าวโพดมีความชื้น 40-50 เปอร์เซ็นต์ แต่ชีวมวลที่มีส่วนประกอบความชื้นต่ำ คือ ใบอ้อยมีความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากส่วนนอกลำต้นของอ้อยได้รับแสงอาทิตย์ตลอดเวลา และเปลือกปาล์มมีความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์

สิ่งเจือปน โดยปกติชีวมวลมีการปนเปื้อนจากดิน หิน และคราบน้ำมันปาล์ม การปนเปื้อนส่งผลให้คราบน้ำมันปาล์มติดแน่นตามทะลายปาล์ม เมื่อคราบน้ำมันปาล์มได้รับความร้อนสูงจนถึง 800 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะเหนียวและติดแน่นในเตาเผา จึงทำให้มีประสิทธิภาพต่ำ

2.2.4 โครงสร้างทางเคมี

เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของชีวมวล สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท (Energy for Environment Foundation. 2008: 6; และสุวดี จางอิสระกุล; และคนอื่นๆ. 2552) ดังนี้

2.2.4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง ทั้งความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ถ้าคาร์บอนคงตัวสูง ทำให้ค่าความร้อนสูงด้วย และชี้เก๊า โดยทั่วไปชีวมวลมีสัดส่วนส่วนประกอบของชี้เก๊าน้อย ยกเว้นฟางข้าวและแกลบข้าว มีส่วนประกอบของชี้เก๊าค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 10-16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สำหรับการวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นการ ให้ความร้อนแก่ ชีวมวล ขที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นตัวชี้วัดความชื้น จากนั้นทำการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในระบบปิดที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำหนักของสารระเหยง่าย และให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในสภาวะคงที่ที่ 750 องศาเซลเซียส ในระบบปิดเป็นสัดส่วนของคาร์บอนคงตัว และส่วนที่เหลือหลังจากการเผาไหม้ด้วยความร้อนจะเป็นชี้เก๊า

2.2.4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนของธาตุหลักทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน

โดยใช้กระบวนการทางเคมีสำหรับการวิเคราะห์หาสัดส่วนของส่วนประกอบแบบแยกธาตุของ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ส่วนปริมาณของธาตุออกซิเจน ได้จากการคำนวณโดย subtracting จากส่วนที่เหลือหลังจากวิเคราะห์ส่วนประกอบอื่นๆ

2.2.5 ชีวมวลในประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ได้ แก่ ข้าว น้ำตาล ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่มีเนื้อที่สำหรับกา รเพาะปลูกและเลี้ยงสัตว์เป็นหลัก ดังนั้นเกษตรกรรมจึงมีความสำคัญในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะการปลูกพืชเศรษฐกิจ เป็นการสร้าง รายได้ให้แก่ประเทศ และพืชผลทางการเกษตรแต่ละประเภท ประกอบด้วยชีวมวลเหลือทิ้งที่สามารถนำมา วิเคราะห์ แสดงในตาราง 3

ตาราง 3 สัดส่วนการเปลี่ยนเป็นชีวมวล

ชนิดพืช	ประเภทชีวมวล	สัดส่วนชีวมวล			
		ค่าเฉลี่ยจากการสำรวจ	ค่าอ้างอิง ⁽¹⁾	ค่าอ้างอิง ⁽²⁾	ค่าอ้างอิง ⁽³⁾
ข้าว	แกลบ	0.226	0.267	0.2-0.25	0.230
	ฟางข้าว(ล่าง/บน)	1.190	0.695	1.60	-
อ้อย	ยอดและใบ	0.204	0.215	-	0.302
	ชานอ้อย	0.303	0.291	0.30	0.291
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	ซังข้าวโพด	0.189	2.00	0.33	0.273
	ลำต้น(ต้น ยอด ใบ)	0.892	-	0.842	-
มันสำปะหลัง	ลำต้น	0.121	-	-	0.088
	เหง้า	0.091	0.088	-	-
สับปะรด	ตอซัง	0.588	-	-	-
ปาล์มน้ำมัน	ทางใบ	0.272	-	-	0.264
	ทะลายปาล์ม	0.215	0.234	0.380	0.428
	กากใย	0.149	0.18	0.239	0.147
	กะลา	0.129	0.073	0.992	0.049
ถั่วเหลือง	ลำต้น เปลือก ใบ	1.177	0.394	-	2.663
มะพร้าว	ทางก้านใบ จั่น/ทะลาย	0.563	-	-	0.274
	เปลือก/กาบ	0.565	0.42	-	0.362
	กะลา	0.247	0.12	-	0.160
ไม้	ถ่านไม้	0.297	-	-	-
	ไม้ทำฟืน	0.248	-	-	-
	เศษไม้	0.101	-	-	0.260
	ขี้เลื่อย	0.034	-	-	-

หมายเหตุ ค่าอ้างอิง ⁽¹⁾ จากวารสารพลังงาน ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในเดือน ตุลาคม -ธันวาคม 2541 เรื่อง ศักยภาพการผลิตและปริมาณการใช้ชีวมวลในประเทศไทย

ค่าอ้างอิง ⁽²⁾ จาก Website ของศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม หัวข้อเรื่อง งานวิจัยสถานภาพของ วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรและการใช้ประโยชน์ 2546

ค่าอ้างอิง ⁽³⁾ ข้อมูลจากการรวบรวมของสำนั กวิจัยคั้นคว่ำพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ในปี 2544-2545

ที่มา: เอทีที คอลซัลแตนท์ ; ทีไอ เอส คอลซัลแตนท์ ; และเอเบิล คอลซัลแตนท์ . (2548). รายงานฉบับสมบูรณ์ การศึกษาและประเมินศักยภาพแหล่งชีวมวล. หน้า 21.

ปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้ในประเทศไทย ขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่ ศักยภาพชีวมวลที่ถูกนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง (Energy for Environment Foundation. 2008: 13-50) มีดังนี้

แกลบข้าว (Rice Husk) ส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการการสีข้าว เมล็ดข้าวลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก ที่มีความยาวน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร มีสีน้ำตาล ซึ่งแกลบข้าวมีความชื้นน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณขี้เถ้า 16-18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถนำมาใช้ผสมกับดิน เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินให้ดีขึ้นก่อนใช้ในการปลูกพืช นำมาสลายด้วยความร้อน ได้ เป็นผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการการสีข้าว จากการเผาไหม้แกลบข้าว เพื่อผลิตพลังงาน ความร้อนในการลดความชื้น ดังนั้นแกลบข้าว เป็นแหล่งกำเนิดเชื้อเพลิงที่ดี เนื่องจากมีขนาดเมล็ดเล็ก และ ความชื้นต่ำเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งข้าวเปลือก 1 ตัน จะมีวัสดุเหลือจากกระบวนการผลิต หรือแกลบข้าวประมาณ 220 กิโลกรัม สามารถคิดเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 90-125 กิโลวัตต์

ฟางข้าว (Rice Straw) เป็นผลิตผลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สำคัญจากการเก็บเกี่ยวข้าว โดย ข้อมูลพื้นฐานจากสถิติการผลิตทางการเกษตร จะมีปริมาณฟางข้าวประมาณ 10 ล้านตันต่อปี สามารถคิด ศักยภาพของค่าความร้อนเทียบเท่าน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 3,900 ล้านลิตร ฟางข้าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ หลากหลาย ได้แก่ การเพาะปลูก และเป็นอาหารสัตว์ รวมทั้งการใช้เชื้อเพลิงจากฟางข้าวผลิตพลังงาน จึง เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยบรรเทาปัญหาของผลที่เกิดจากการเผาฟาง อย่างไรก็ตามฟางข้าวมีความเป็นไปได้ ต่ำในด้านการผลิตไฟฟ้า แต่ฟางข้าวนำมาใช้เผาไหม้ให้ความร้อนร่วมกับ น้ำมันเชื้อเพลิงหรือลดปริมาณการ ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม มีความเป็นไปได้มากกว่าทั้งเรื่องทางด้านเทคนิคและเศรษฐกิจ

ขานอ้อย (Bagasses) เป็นส่วนที่เหลือจากชีวมวลหลังจากกระบวนการการผลิตได้จากโรงงาน น้ำตาล มีขนาด 10-20 เซนติเมตร และมีความชื้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมากขานอ้อยจะถูกนำมาใช้ เป็นแหล่งกำเนิดเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม ทั้งนี้ไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด และใช้ทำ เยื่อกระดาษ ซึ่งอ้อย 1 ตันมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิต หรือขาน อ้อยประมาณ 290 กิโลกรัม สามารถเทียบเท่าพลังงาน ไฟฟ้าได้ 100 กิโลวัตต์

วัสดุเหลือทิ้งจากน้ำมันปาล์ม

- เส้นใยปาล์ม เป็นส่วนที่เหลือจากการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยเส้นใยสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง
- เมล็ดปาล์มน้ำมัน เป็นส่วนเหลือทิ้งรูปแบบหนึ่งจากการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งเมล็ดที่มีขนาดเล็ก 1-2 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ เมล็ดปาล์มน้ำมันจะมีความชื้นต่ำและค่าความร้อนสูง ดังนั้นจึงมีความต้องการที่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม
- ทะลายปาล์มเปล่า เป็นส่วนเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำมันปาล์มในสมัยก่อนจะมีการกำจัดด้วยการ เผา ซึ่งปัจจุบันทะลายปาล์มเปล่าสามารถนำมาแทนที่เชื้อเพลิงสำหรับการเพาะปลูก ไม่นิยมใช้เป็น เชื้อเพลิงเนื่องจากมีส่วนประกอบของ อัลคาไลน์สูง เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้กับหม้อต้มน้ำที่ อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ทำให้ขี้เถ้าของทะลายปาล์มเปล่า จะมีกลิ่นและเหนียว ทำให้ ประสิทธิภาพของการเผาไหม้หรือการถ่ายโอนความร้อนแก่หม้อไอน้ำลดลง

ซังข้าวโพด (Corn cobs) เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเอทิลแอลกอฮอล์ ปัจจุบันมีความต้องการสูงถึง 200,000 ตันต่อปี นอกจากนี้ซังข้าวโพดสามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย ได้แก่ เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการลดความชื้นของเมล็ดข้าวโพด ทำก้อนผงถ่านชาร์จากการย่อยสลายด้วย ความร้อน ผสมกับอาหารสัตว์ และใช้ทำปุ๋ยได้

เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) การป้อนวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตกระดาษ ซึ่งเป็นเศษไม้เหลือทิ้งประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ โดยเปลือกไม้ทั้งหมดในอุตสาหกรรมทำเยื่อกระดาษจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการผลิต แต่เนื่องจากเปลือกไม้มีความชื้นสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง ดังนั้น จึงได้มีการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมกับขี้เถ้าเปลือกเพื่อที่จะให้มีความชื้นลดลง และไม้ยูคาลิปตัสสามารถใช้ในการผลิตปุ๋ยได้

ชีวมวลจากพืชผลทางการเกษตรที่มีจำนวนมาก เกษตรกรมักจะนำไปเผาทิ้ง เพื่อเป็นการกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้ง แต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากข้อมูลการศึ กษาและวิเคราะห์ต่างๆ พบว่า (เทคนิคคอล เอ็นเนอร์จี คอนซิลแท้นท์ . 2554: 3) ชีวมวลสามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงาน จึงได้มีการทำประเมินข้อมูลศักยภาพพลังงานชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทย ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ แสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ศักยภาพพลังงานชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทย ปี 2552

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้ (ตัน)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อ กิโลกรัม)	ศักยภาพพลังงาน	
					(เทระจูล)	(กิโลตัน)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใย	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	14.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203.740	9.83	21,824.24	516.62
มันสำปะหลัง	30,088.025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,890.82	15.40	9,686.46	229.30
		กาบ	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	17.93	2,311.83	54.73
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	14,5853,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน . (2552). ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [ออนไลน์].

2.3 การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

ตาราง 5 เปรียบเทียบการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

ข้อดี	ข้อจำกัด
1.) เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน	1.) ชีวมวลเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากการ แปรรูปทางการเกษตร มีปริมาณสำรอง ไม่แน่นอน ไม่สามารถควบคุมได้
2.) ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก	2.) การบริหารจัดการเชื้อเพลิงทำได้ยาก
3.) เสริมความมั่นคงด้านพลังงานแก่ ประเทศเพิ่มขึ้น	3.) ราคาชีวมวลแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากมี ความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
4.) ใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมา ใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า	4.) ชีวมวลที่มีศักยภาพเหลืออยู่ มักจะอยู่กระจัด กระจาย มีความชื้นสูงจึงทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า สูงขึ้น เช่น ใบอ้อยและยอดอ้อย ทะลายปาล์ม เป็นต้น

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). *การใช้ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย*. หน้า 12.

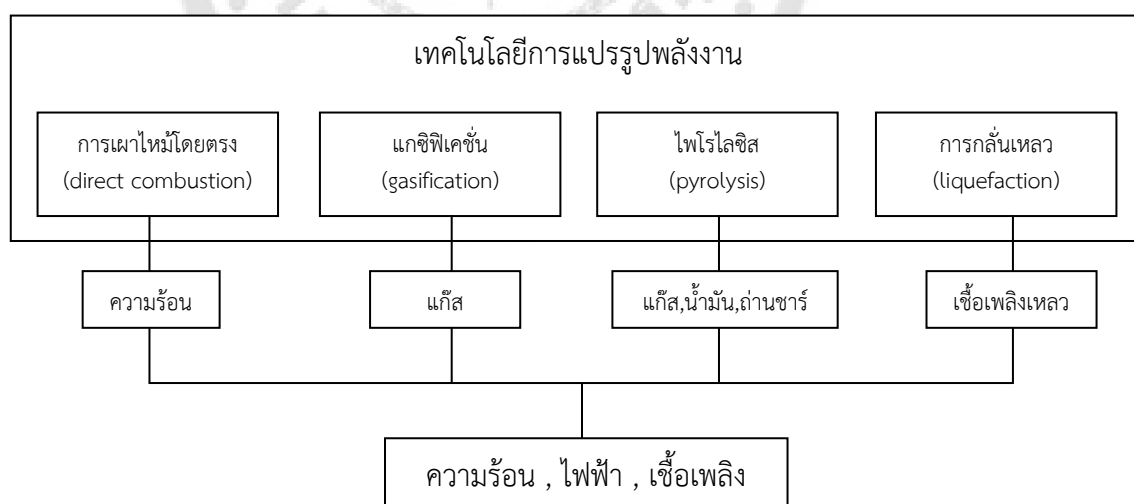
2.4 กระถินณรงค์

กระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis* Benth) หรือ Black Wattle (หิรัญ ชันทองคำ ; เรืองวุฒิ แจ่มวุฒิปรีชา; และสุภาพค์ แสงสันต์. 2547: 5-12) เป็นพันธุ์ไม้ที่มีถิ่นกำเนิดตามธรรมชาติในทุ่งหญ้าประเทศปาปัวนิวกินี เนื่องจากกระถินณรงค์เป็นไม้ที่ปลูกง่าย สามารถขึ้นได้ทุกสภาพท้องที่ ปัจจุบันจึงได้มีการนำมาปลูกกันอย่างแพร่หลาย ทั้งทวีปเอเชีย แอฟริกา และอเมริกาใต้ สำหรับประเทศไทยเชื่อกันว่ากระถินณรงค์มีการนำเข้ามาปลูกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 เพื่อปลูกเป็นไม้ประดับ และสามารถฟื้นฟูสภาพป่าเสื่อมโทรมได้ สำหรับกระถินณรงค์จัดว่าเป็นพืชตระกูลถั่ว ที่รากมีแบคทีเรีย สามารถตรึงไนโตรเจนได้ดี จัดอยู่ในประเภทไม้ยืนต้น เป็นไม้ไม่ผลัดใบ จึงเห็นใบเขียวช่อตลอดปี ที่มีลักษณะเป็นไม้ขนาดเล็กถึงขนาดกลางมีความสูง 8 เมตร ถึง 20 เมตร ใบพุ่มหนา เรือนยอดแผ่กว้าง แตก กิ่งก้าน สาขามากที่ส่วนล่างลำต้นเมื่อมีสภาพพื้นที่แล้งลำ ต้นจะคดงอแตกกิ่งก้านมาก แต่ในสภาพพื้นที่ที่เหมาะสมจะมีลำต้นตรงมีเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 80 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร ซึ่งปัจจัยในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกระถินณรงค์จะขึ้นเป็นกลุ่มตามแหล่งธรรมชาติ เป็นพันธุ์ไม้ที่ต้องการแสงแดดอย่างเต็มที่ สามารถขึ้นได้ดีในที่ชื้นที่มีปริมาณน้ำฝนระหว่าง 1,500-1,800 มิลลิเมตรต่อปี แต่สามารถเจริญเติบโตได้ในท้องที่แห้งแล้งที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 26-30 องศาเซลเซียส ทนต่อสภาพดินหลายชนิด ทั้งดินเหนียว ดินลูกรัง หรือดินที่ไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์ มีแร่ธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตน้อย โดยสภาพดินที่เหมาะสมที่สุดในการเจริญเติบโตของกระถินณรงค์ คือ ดินร่วนปนทราย ที่เป็นกรดเล็กน้อย ปลูกได้ทุกท้องที่ ส่วนใหญ่มักปลูกเป็นไม้ให้ร่มเงาตามสวนสาธารณะ หรือริมถนน มักพบว่ากระถินณรงค์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ดังนี้

- ใช้เป็นเชื้อเพลิง กระถินณรงค์มีคุณสมบัติของเนื้อไม้ที่เหมาะสมใน การใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงได้ดีมาก เนื่องจากให้ค่าความร้อนสูง เมื่อนำไปเผาถ่านจะได้คุณภาพถ่านที่ดี ในขณะที่นำไปใช้จะไม่แตก ไม้มีควัน และติดไฟได้ดี จึงเป็นไม้ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกเป็นป่าฟันเพื่อใช้สอยในครัวเรือน
- ใช้ทำเครื่องเรือนและก่อสร้าง เป็นเนื้อไม้ที่มีแก่น ความแข็งแรงปานกลาง สามารถเลื่อยตัดแต่งได้ง่าย มีการยืดหดตัวน้อยมาก เหมาะที่จะนำมาใช้ทำเป็นเฟอร์นิเจอร์หรือพื้นปาร์เก้
- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ จะได้เยื่อกระดาษที่มีความเหนียวดีพอสมควร
- ใช้ประโยชน์ในการฟอกหนังสัตว์ จากการนำเปลือกที่ให้น้ำฝาด ละลายน้ำได้ ถ้าใช้สารแทนนิน จากเปลือกที่อัตราความเข้มข้น 13 เปอร์เซ็นต์ จะได้หนังฟอกที่มีคุณภาพดีแต่มีสีค่อนข้างแดง
- สามารถปลูกได้ในสภาพดินเลว เพื่อปรับปรุงและฟื้นฟูสภาพดินให้ดีขึ้น
- ประโยชน์อื่นๆ ทั้งปลูกไว้ให้ร่มเงาตามที่ สาธารณะ หรือตามถนนหนทาง และมีสภาพที่เหมาะสม ทำให้เกิดเห็ดได้ต้นกระถินณรงค์ สามารถนำมารับประทานเป็นอาหารได้ เป็นต้น

2.5 การแปรรูปพลังงานชีวมวล

ชีวมวลสามารถแปรรูปเป็นพลังงานเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยเกิดจากการแตกตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวลด้วยเทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานชีวมวล ที่มีหลากหลายรูปแบบ ทั้งเทคโนโลยีทางเคมีความร้อน (thermo-chemical process) และเทคโนโลยีทางชีวเคมี (bio-chemical process) ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีมีกระบวนการหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการดำเนินการและต้องพิจารณาตามชนิดของชีวมวลและพลังงานที่ได้รับ ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส (วรนุช แจงสว่าง. 2551: 124; Erakhrumen Andrew Agbontalor. 2007: 664-666) แสดงในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานชีวมวล

ที่มา: สุพจน์ แหวนเพชร. (2552). การผลิตไบโอออยล์จากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว. หน้า 24.

สำหรับแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ สามารถกระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีทางเคมีความร้อน เป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานที่มีคุณภาพสูงขึ้นโดยใช้ความร้อน ประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) ไพโรไลซิส (pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และลิกวิฟแฟกชัน (liquefaction) (ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2551: 3-9)

2.5.1 การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion)

เป็นการแปรรูปชีวมวลด้วยการใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศ เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ จากการทำปฏิกิริยาเชื้อเพลิงกับออกซิเจน จะได้เป็นผลิตภัณฑ์พลังงานความร้อนออกมา รวมทั้งแก๊ส น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยตรงจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของชีวมวล เตาเผา ปริมาณอากาศ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้

2.5.2 แก๊สซิฟิเคชัน (gasification)

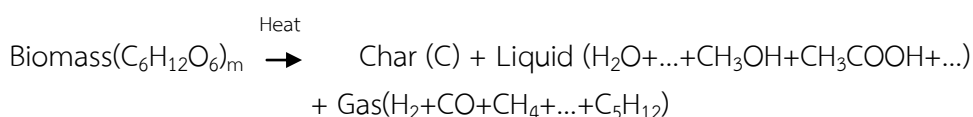
เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนด้วยปฏิกิริยาเคมี ทำการสลายคาร์บอนในชีวมวลให้เป็นแก๊สทั้งหมด โดยเผาชีวมวลภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500-1400 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจน และผลิตภัณฑ์รวมทั้งแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยแก๊สชีวมวลที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในด้านต่างๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาเคมี สารตั้งต้น และลักษณะของเตาที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวมวล ซึ่งปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยง่ายในวัตถุดิบ และเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ และแก๊สตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป

2.5.3 ลิกวิฟแฟกชัน (liquefaction)

เป็นการแปรรูปชีวมวลของแข็งให้เป็นของเหลวด้วยการใช้ความร้อน หรือการร่วมกับตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส ส่วนหนึ่งจะได้เป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมากในรูปของเหลว และอีกส่วนได้แก๊สในปริมาณน้อย โดยกระบวนการจะต้องคำนึงถึงการให้ความร้อน ซึ่งมีผลต่อวัตถุดิบที่ใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

2.5.4 การไพโรไลซิส (pyrolysis)

การไพโรไลซิส เป็นการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยให้ความร้อน แก่ระบบภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส คือ แก๊ส ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ของเหลว เป็นน้ำมันชีวภาพและกากยางเหนียว และของแข็ง หรือถ่านชาร์ โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนและอุณหภูมิสุดท้าย มีความเป็นไปได้ในการปรับสภาพสัดส่วนได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ของเหลว และของแข็ง เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน จะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



2.6 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis process)

กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็นสองกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อน และขนาดอนุภาค (Mohammad I. Jahirul; et al. 2012: 4956)

2.6.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

เป็นการให้อุณหภูมิและอัตราความร้อนต่ำ โดยเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนสูงประมาณ 5-30 นาที ทำให้ของเหลวกลายเป็น ไออ เมื่อส่วนประกอบในชั้นน้ำทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันอย่างต่อเนื่อง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว สำหรับเทคโนโลยีนี้มีข้อจำกัดของความไม่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพให้มีคุณภาพดี จากการสลายตัวด้วยความร้อนผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าระหว่างเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนสูง มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์และปริมาณของน้ำมันชีวภาพ

2.6.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

เป็นการย่อยสลายของส่วนประกอบสารอินทรีย์ด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส กระบวนการนี้เป็นการป้อนวัตถุดิบที่มีความชื้นน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร ด้วยเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนน้อยในช่วงเวลา 0.5-2.0 วินาที และมีมาตรฐานร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ น้ำมันชีวภาพได้ 60-75 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง ได้ 15-25 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สได้ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับการป้อนสาร คุณสมบัติพื้นฐานของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ มีการถ่ายเทความร้อนและอัตราการให้ความร้อนสูง เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนสั้น เทคโนโลยีกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว สามารถทำได้ง่าย มีการขนย้ายและกักเก็บได้สะดวก อีกทั้งได้รับประโยชน์เป็นผลิตภัณฑ์เคมี มีราคาต้นทุนต่ำ และได้ประสิทธิภาพพลังงานสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบและปัจจัยของกระบวนการไพโรไลซิส แสดงในตาราง 6

ตาราง 6 รูปแบบและปัจจัยของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส	ช้า	เร็ว
เวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อน (วินาที)	450-550	0.5-1.0
อัตราการให้ความร้อน (เคลวินต่อวินาที)	0.1-1.0	10-200
ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	5-50	< 1
อุณหภูมิ (เคลวิน)	550-950	850-1250
น้ำมันชีวภาพ	30	50
ผลิตภัณฑ์ (%)		
ถ่านชาร์	35	20
แก๊ส	35	30

ที่มา: Mohammad; et al, (2012). Biofuel production through biomass pyrolysis – A technological review. *Energies*. 5: 4956.

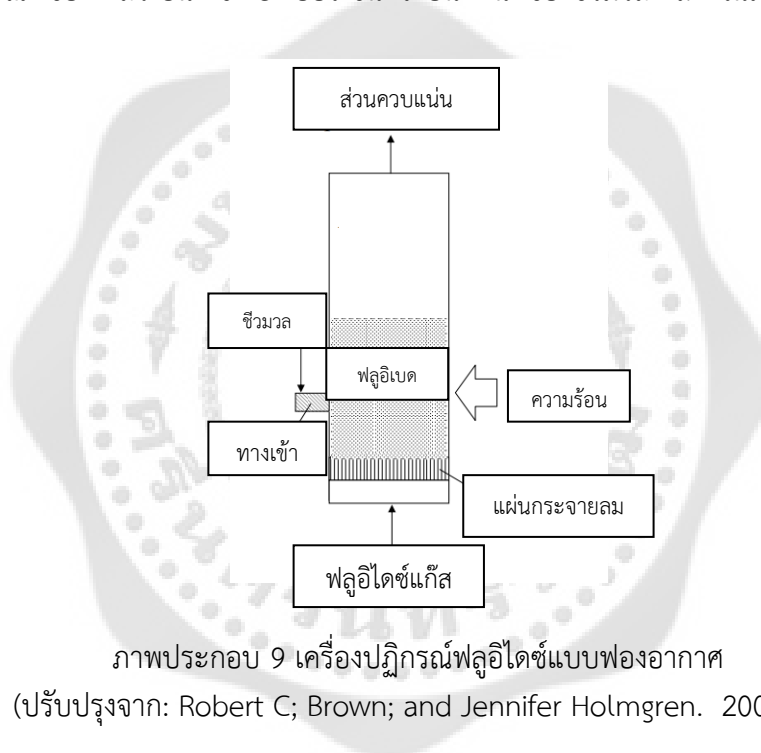
2.6.2.1 ชนิดเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมี 5 ประเภท

(Mohammad; et al. 2012: 4961-4964; and Samy Sadaka. 2009: 3-4) ได้แก่

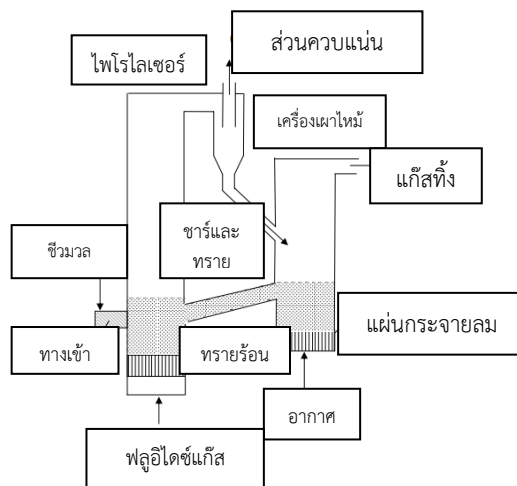
(1.) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบฟองอากาศ (bubbling fluidized bed)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบและมีการใช้งานอย่างง่าย มีการควบคุมอุณหภูมิ การถ่ายโอนความร้อนและสามารถกักเก็บได้ดี เนื่องจากความหนาแน่นของของแข็งในเบตสูง มีการดำเนินปฏิกิริยาด้วยการป้อนทรายร้อน ชีวมวลที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2-3 มิลลิเมตรและฟองแก๊สเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง ทำให้ชีวมวลได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วตามการเคลื่อนที่ของฟองแก๊ส เกิดการสลายตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง ละอองของเหลว น้ำมันชีวภาพ และแก๊ส เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบฟองอากาศเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่อง จากให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูง และให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็น 70-75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของชีวมวล แสดงในภาพประกอบ 9



(2.) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบไหลเวียนและเบตแบบถ่ายโอน (circulating fluidized bed and transport reactor)

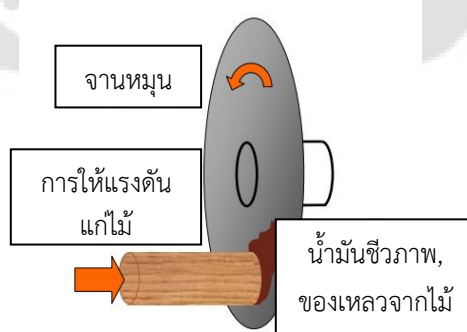
เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบฟองอากาศ (bubbling fluidized bed) ยกเว้นเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนน้อยมาก ส่งผลให้เกิดอัตราความเร็วแก๊สและองค์ประกอบของของแข็งในน้ำมันชีวภาพสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์แบบฟองอากาศ (bubbling fluidized bed) แสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์แบบไหลเวียนและเบดแบบถ้ำยอน
(ปรับปรุงจาก: Robert C; Brown; and Jennifer Holmgren. 2006: 8)

(3.) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (ablative pyrolysis reactor)

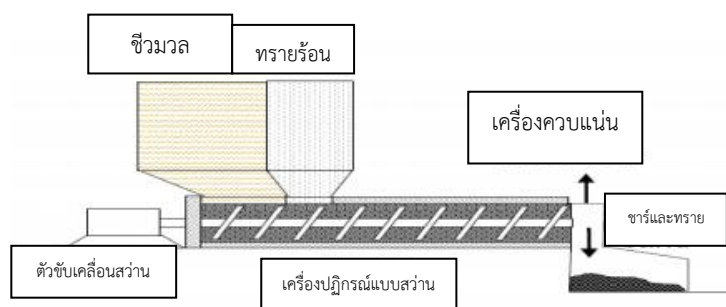
เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีกระบวนการแตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนผ่านชั้นหลอมละลายที่ผิวปฏิกรณ์ให้ความร้อน และไม่ใช่แก๊สตัวพา เป็นการให้ความดันสูงแก่ไอน้ำให้ต้านกับผิวปฏิกรณ์ที่ให้ความร้อน โดยเกิดการเคลื่อนที่หนีศูนย์กลางหรือการเคลื่อนที่เชิงกล ทำให้ไอน้ำสัมผัสกับผิวเกิดการหลอมละลาย ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แอบลาทีฟ คือ การป้อนไอน้ำไม่จำเป็นต้องบดอนุภาคให้มีปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการ และกระบวนการนี้สามารถใช้อุณหภูมิที่มากกว่ารูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ แสดงในภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ
(ปรับปรุงจาก: Robert C; Brown; and Jennifer Holmgren. 2006: 10)

(4.) เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (auger reactor)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานด้วย การป้อนชีวมวลผ่านท่อความร้อนที่มีออกซิเจน และใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสระหว่าง 400-800 องศาเซลเซียส ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู มีการทำงานอย่างต่อเนื่องด้วยมอเตอร์ โดยใช้ทรายร้อนเป็นตัวกลาง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์ แก๊สที่ได้ถูกควบแน่น กลายเป็นน้ำมันชีวภาพ และส่วนไอแก๊สที่เหลือจะสะสมตัวเป็นแก๊สชีวภาพ (Pavin Kumar. 2011: 1-2) แสดงในภาพประกอบ 12

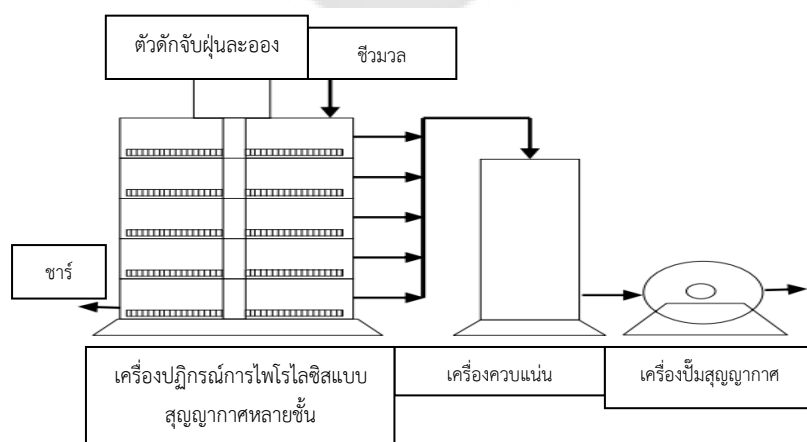


ภาพประกอบ 12 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน

(ปรับปรุงจาก: Robert C; Brown; and Jennifer Holmgren. 2006: 12)

(5.) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (vacuum pyrolysis)

เป็นเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นของเหลว ด้วยอัตราการถ่ายโอนความร้อนในการสลายตัวของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เวลานาน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพน้อยลงมี ร้อยละ 30-45 เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีฟลูอิดเบดที่มีร้อยละ 70 การไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ ชีวมวลจะแตกสลายด้วยแรงโน้มถ่วงและการหมุนผ่านการไพโรไลซิสแบบหลายชั้น ด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 200-400 องศาเซลเซียส ชีวมวลเคลื่อนตามสายพานไปยังเครื่องบีบสุญญากาศ อุณหภูมิสูง สามารถใช้ขนาดใหญ่มากและแก๊สตัวพา แสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ

(ปรับปรุงจาก: Robert C; Brown; and Jennifer Holmgren. 2006: 11)

2.6.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส

ตัวแปรต่างๆ มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล มีความสนใจในผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยตัวแปรพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ สารตั้งต้น ขนาดอนุภาค ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ และอัตราการไหลแก๊สตัวพา (Samy Sadaka. 2008: 10-14; and Jan-Ems Joubert. 2013: 13-14)

องค์ประกอบของสารตั้งต้น

โดยทั่วไปชีวมวลเป็นวัตถุดิบที่มีลักษณะซับซ้อนและมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและส่วนประกอบของชีวมวลในพืชแต่ละประเภท ซึ่งเนื้อไม้ประกอบด้วยผนังเซลล์เป็นองค์ประกอบหลัก ที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลส 30-40 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 25-30 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 12-30 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบเหล่านี้ทำให้เกิดรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายและซับซ้อนระหว่างการไพโรไลซิสชีวมวล โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเกิดการแตกตัวได้เป็นกาวยางเหนียวประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และชาร์ปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินจะควบแน่นเป็นชาร์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน และสารประกอบ ฟีนอลบ้างเล็กน้อย ซึ่งความแตกต่างของชีวมวลเป็นสิ่งกีดขวางต่อการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับจากแต่ละองค์ประกอบจะให้ผลิตภัณฑ์น้อย ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ของชาร์และเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวล

ขนาดอนุภาค (particle size)

ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างการไพโรไลซิส เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กเกินไป จะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมาก

อุณหภูมิ (temperature) (Paul T. Williams; and Serpil Besler. 1996; และ Pushkaraj R. Patwardhan; et al. 2010: 48-49)

อุณหภูมิ เป็นตัวแปรที่สำคัญ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิส โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสชีวมวลให้ผลสำคัญที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ทั้งน้ำมันชีวภาพ ชาร์ และแก๊ส ซึ่งการไพโรไลซิสแบบเร็ว มีขอบเขตของอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นหลัก ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูงกว่า 600 องศาเซลเซียส เกิดการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลอย่างต่อเนื่อง ทำให้ได้ผลได้ทั้งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ และถ่านชาร์ และที่อุณหภูมิสูงกว่า 750 องศาเซลเซียส จะได้แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยสลาย ส่วนประกอบของชีวมวลทั้งเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินด้วยความร้อน พบว่าอุณหภูมิระหว่าง 220-315 องศาเซลเซียส เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส และอุณหภูมิระหว่าง 315-400 องศาเซลเซียส เกิดการย่อยสลายเซลลูโลส ในขณะที่ลิกนินเกิดการย่อยสลายที่อุณหภูมิระหว่าง 250-900 องศาเซลเซียส นอกจากนี้มีการศึกษาผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพอย่างเหมาะสม พบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 475-525 องศาเซลเซียส จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมากที่สุด ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นและช่วงเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนนานในการย่อยสลายอย่างต่อเนื่องจากการไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิกลายเป็นไอ และได้แก๊สเพิ่มมากขึ้น

อัตราการให้ความร้อน (heating rate) (Ana A. Rengel l. 2007: 11-12)

ระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่ออัตรา ขอบเขต และความต่อเนื่อง ของปฏิกิริยาการ ไพรอลิซิส และส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ การดำเนินปฏิกิริยาการไพรอลิซิสอย่างต่อเนื่องตามขอบเขต ของอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและการย่อยสลายชีวมวลได้เป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ หลากหลายเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิที่ได้จากการให้ ความร้อนอย่างต่อเนื่องของผลิตภัณฑ์เริ่มต้น สำหรับการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาการสลายตัวของผลิตภัณฑ์น้อย ส่วนอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมระหว่างกระบวนการไพรอลิซิสแบบเร็ว ส่งผลให้ถ่านชาร์มี ปริมาณน้อยหรือไม่มีเลย โดยที่ ทั่วไปแล้วอุณหภูมิและชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์จะมี ความแตกต่างกันมาก ดังนั้นอุณหภูมิที่สูงมากขึ้น อัตราของปฏิกิริยาจะได้รับการควบคุมโดยอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่า จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการไพรอลิซิสชีวมวล ได้แก่ ชาร์ กากยางเหนียว น้ำส้มคั้น ควันไม้ และ แก๊ส โดยที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ซึ่งชีวมวลจากไม้เนื้อแข็งจะได้ปริมาณ ชาร์น้อย แต่ให้ความเป็นกรดมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ส่วนการให้อัตราความร้อนสูง จะได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ สารระเหยง่ายทั้งแก๊สและของเหลวปริมาณมาก ในขณะที่ชาร์ มีจำนวนน้อยลง อีกทั้งผลกระทบของอัตรา การให้ความร้อนสามารถพิจารณาได้จากผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ ชีวมวลสัมผัสความร้อน เมื่ออัตราการให้ความร้อนสูง ระยะเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนของสารระเหยง่ายต่ำ

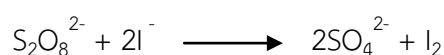
การศึกษาอัตราการให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส ต่อวินาทีของไม้ ที่มีขนาดอนุภาค 1 ไมโครเมตรภายใต้ฟลูอิดซ์เบดที่ 800 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ชาร์ปริมาณน้อย (<10%) (Aarsen et al. 1985) นอกจากนี้ได้มีการศึกษากระบวนการไพรอลิซิสแบบเร็วที่มีอัตราการให้ความร้อน 1000 องศาเซลเซียสต่อวินาที พบว่าได้ผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวมากที่สุดจากชีวมวล (Ayll'on et al. 2006)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

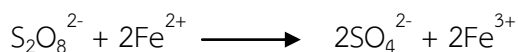
ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ (Jim Clark. 2002: Online) คือ heterogeneous และ homogeneous

1. Homogeneous catalysis

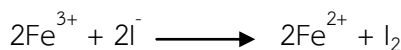
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวทำปฏิกิริยา เป็นเฟสเดียวกัน ได้แก่ ของแข็งกับตัวทำปฏิกิริยา ของแข็ง ของเหลวกับตัวทำปฏิกิริยาของเหลว และแก๊สกับตัวทำปฏิกิริยาแก๊ส ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา ระหว่างเปอร์ซัลเฟตไดออกไซด์ ($S_2O_8^{2-}$) และไอโอดีนไดออกไซด์ (I^-) ซึ่งเปอร์ซัลเฟตไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์ ส่วนไอโอดีนไดออกไซด์สามารถถูกออกซิไดส์อย่างง่ายเป็นไอโอดีน สามารถแสดงได้ดังนี้



เนื่องจากปฏิกิริยาจะต้องมีการชนกันระหว่างไอออนลบ 2 ตัว จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่าง กัน ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นปัจจัยในการหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาดังกล่าวโดยใช้ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเป็นโลหะ แทรนซิชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากโลหะทรานซิชันนั้นมีความสามารถในการเปลี่ยนสภาวะออกซิเดชัน ซึ่ง $S_2O_8^{2-}$ จะออกซิไดส์ไอออนของ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} แล้ว $S_2O_8^{2-}$ จะถูกรีดิวซ์เป็นซัลเฟตไดออกไซด์



Fe^{3+} จะออกซิไดส์ไอออนของไอโอดีนเป็นไอโอดีน ซึ่งในกระบวนการนี้สามารถออกซิไดส์เป็น Fe^{2+} ได้อีกครั้ง ดังสมการ



2. Heterogeneous catalysis

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความต่างเฟสของตัวทำปฏิกิริยา ได้แก่ ของแข็งกับตัวทำปฏิกิริยาทั้งของเหลวหรือแก๊ส ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาระหว่างอีเทนและไฮโดรเจนด้วยตัวเร่งของนิกเกิล (Ni)



โมเลกุลของอีเทนจะรวมตัวกันบนผิวของนิกเกิล ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะไปสร้างใหม่บนผิวนิกเกิล เมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนยึดติดผิวนิกเกิล แล้วโมเลกุลไฮโดรเจนจะแตกออกอยู่ในรูปของอะตอม ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปรอบๆบริเวณผิวนิกเกิล ถ้าอะตอมไฮโดรเจนแพร่กระจายใกล้กับโมเลกุลคาร์บอนที่มีพันธะเชื่อมต่อกับผิวนิกเกิล แล้วจะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนและนิกเกิลถูกแทนที่ด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน แล้วได้เป็นโมเลกุลผลิตภัณฑ์ที่เกิดการแตกตัวอย่างอิสระ และเกิดที่ว่างบนผิวของนิกเกิล ทำให้โมเลกุลตัวทำปฏิกิริยาเข้าไปแทนที่ที่เกิดกระบวนการทั้งหมดอีกครั้ง

2.6.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส (Younes Chhiti; and Mohammed Kemiha. 2013: 77)

- ถ่านชาร์ เป็นส่วนที่เหลือในรูปของแข็งจากการไพโรไลซิส มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เกิดสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างทั้งพีแนนทรีน และแอนทราซีนระหว่างการไพโรไลซิสชีวมวล โดย เฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบของถ่านกัมมันต์ อีกทางเลือกหนึ่งถ่านชาร์สามารถเกิดการกระตุ้นคาร์บอนและใช้ในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ได้

- ของเหลว ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสชีวมวล คือ น้ำมันชีวภาพ เกิดจากการให้ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน ในช่วงเวลาสั้นและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือทำให้เย็นลงจากอุณหภูมิการไพโรไลซิส น้ำมันชีวภาพเป็นการควบแน่นของไอแก๊สให้กลายเป็นของเหลวด้วยปฏิกิริยาการไพโรไลซิส และกาขยายเหนียว ของเหลวมีลักษณะข้นสีดำ เป็นสารประกอบซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวงวงแหวนแนพทาลินเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของกาขยายเหนียวมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ $\text{C}_5\text{-C}_6$ ประกอบด้วยโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ

- แก๊ส ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์หลักๆ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และ คาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้มีกลุ่มไฮโดรคาร์บอนในปริมาณเล็กน้อย สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูง ในขณะที่แก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.7 น้ำมันชีวภาพ (bio-oil)

น้ำมันชีวภาพ (James L. Easterly, P.E. 2002: 1-3) มีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวหนืดสีน้ำตาลเข้ม ผลผลิตที่ได้คล้ายคลึงกับน้ำมันดิบจากฟอสซิล ที่มีกลิ่นฉุนเหมือนควั่น น้ำมันชีวภาพประกอบด้วย สารประกอบออกซิเจน เช่น คาร์บอนิล คาร์บอกซิล และ ฟีนอลิก สารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรด เอสเทอร์ เป็นต้น และสารประกอบที่ไม่สามารถละลายน้ำ เรียกว่า ลิกนิน ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพมีน้ำสูงประมาณ ร้อยละ 20-25 จากวัตถุดิบชีวมวลและกระบวนการแปรรูปด้วยการไพโรไลซิสที่มีความชื้นสูง สารลิกนิน ร้อยละ 25-30 กรดอินทรีย์ ร้อยละ 5-12 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ร้อยละ 5-10 ผลึกน้ำตาล ร้อยละ 5-10 และสารประกอบออกซิเจนอื่น ๆ ร้อยละ 10-25 และสารประกอบหลักที่สำคัญของน้ำมันชีวภาพ มีลักษณะคล้ายองค์ประกอบของ ชีวมวลที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนสูง ให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ต่ำกว่าค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลประมาณร้อยละ 50 น้ำมันชีวภาพเป็นกรดที่ไม่รุนแรง แต่ถ้ามีค่าความเป็นกรด (pH) 2-4 ส่งผลให้ไม่เสถียรและเกิดการกัดกร่อนสูง ปัจจุบันการขนส่งและการกักเก็บจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนกรดสูง เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากความเป็นกรดของเชื้อเพลิง และไม่สามารถที่จะผสมกับเชื้อเพลิงที่ได้จากปิโตรเลียม ในขณะที่น้ำมันชีวภาพมีศักยภาพสูง เมื่อเผาไหม้มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ต่ำ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีศักยภาพและปราศจากสิ่งสกปรก นำไปใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง และสารเคมีอินทรีย์ โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แสดงในตาราง 7

ตาราง 7 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

คุณสมบัติ	Bio-oil	Heavy fuel oil
ค่าความชื้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	15-30	0.1
pH	2.5	-
C	54-58	85
H	5.5-7.0	11
O	35-40	1.0
ซีเถ้า	0-0.2	0.1
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	16-19	40

ที่มา: Zhang Qi; et al. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management*. (48): 88.

น้ำมันชีวภาพ (สำนักคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ . 2543: ออนไลน์) เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ทั้งไม่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สเรือนกระจก เพราะน้ำมันชีวภาพได้มาจาก ชีวมวล ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ไม่มีสารประกอบซัลเฟอร์ ดังนั้นในขณะที่เผาไหม้จึงไม่ก่อให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์น้อยกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 50 ในระบบกังหันแก๊ส และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย (S. Czernik; and A.V. Bridgwater. 2004: 592-597; และทองศักดิ์วัฒนา. 2553: 67) ได้แก่

เชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ เพื่อใช้ในการผลิตความร้อนและพลังงาน มีการลุกไหม้จากกระบวนการเผาไหม้น้ำมันชีวภาพมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง โดยทั่วไปมีการปล่อยมลพิษต่ำกว่าการเผาไหม้น้ำมันหนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำมันชีวภาพ

เชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์ดีเซลมีประสิทธิภาพมากสูง 45 เปอร์เซ็นต์ใช้ในการผลิตพลังงาน และสามารถปรับให้เหมาะกับกระบวนการ นำมารวมกันของความร้อนและพลังงาน สำหรับคุณสมบัติของของเหลวการใช้เครื่องยนต์ด้วยน้ำมันชีวภาพ ซึ่งกระบวนการที่เผาไหม้ยาก ส่งผลต่อค่าความร้อนต่ำ และมี องค์ประกอบของน้ำสูง เกิดการกัดกร่อนจากความเป็นกรด เมื่อเทียบศักยภาพของการใช้น้ำมันชีวภาพที่ค่าพลังงานออกจากเครื่องยนต์ จะมีการปล่อยมลพิษทางอากาศในปริมาณต่ำ กว่าน้ำมันจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก

เชื้อเพลิงให้กับกังหันแก๊ส กังหันแก๊สได้มีก ารนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และให้พลังงาน ส่วนใหญ่ปัจจุบันได้มีการใช้กังหันแก๊สสำหรับการกลั่นปิโตรเลียม หรือเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งกังหันแก๊สที่มีแบบเหมาะสม จะสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ ปัจจุบันกังหันแก๊สสามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมสำหรับคุณสมบัติน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสชีวมวล และจะต้องพิจารณาผลกระทบของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันชีวภาพประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ลักษณะที่เป็นแก๊สและการปล่อยมลพิษ อีกทั้งส่วนที่สำคัญที่สุด คือ ความเข้ากันได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้กับวัตถุดิบที่ใช้ในระบบเชื้อเพลิง เช่น การกัดกร่อนของความเป็นกรด

การประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพสำหรับผลิตภัณฑ์เคมี ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ เป็นแหล่งกำเนิดหลักของคุณสมบัติทางเคมี เช่น เมทานอล กรดอะซิติก กรดไขมัน กรดไขมัน เป็นต้น ในปัจจุบันส่วนมากของสารประกอบสามารถนำมาผลิตได้ในราคาที่ต่ำกว่าจากวัตถุดิบอื่นๆ ที่ได้จากแก๊สธรรมชาติ น้ำมันดิบ หรือถ่านหิน

2.8 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุพจน์ แหวนเพชร (2552) ศึกษาการผลิตไบโอเอทิลจากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง วิเคราะห์ตัวแปรทั้งอุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อนสาร อัตราการไหลของแก๊สตัวพา องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อผลได้ของน้ำมันชีวภาพ โดยเตรียมผักตบชวามาบดอนุภาคให้มีขนาดน้อยกว่า 425 ไมโครเมตร 425-600 ไมโครเมตรและ 600 ไมโครเมตรขึ้นไป อบไล่ความชื้นนาน 6 ชั่วโมง จากนั้นนำชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ศึกษาที่อุณหภูมิ 400 425 450 475 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาที่ 0 50 100 200 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เหลวร้อยละ 38.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แก๊สให้ร้อยละ 43.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และถ่านชาร์ให้ร้อยละ 21.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลวจะได้เป็นน้ำมันเบาร้อยละ 22.98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และน้ำมันหนักให้ร้อยละ 15.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความร้อนน้ำมันเบา 41.05 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด 4.8 และน้ำมันหนักให้ค่าความร้อน 31.0 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด 3-4 และพบองค์ประกอบหลักในน้ำมันเบา ได้แก่ 1,3-Cyclopentanone 4-hydroxy-4-methyl-2-Pentanone และ 2, 2, 6, 6-Tetramethyl-4-Piperidinone เป็นต้น องค์ประกอบหลักในน้ำมันหนัก ได้แก่ Phenol 4-hydroxymethyl-2-Pentanone และ 4-hydroxy-2-Pentanone เป็นต้น

วิณัฐ สุดสุข; และ ศิริภัสสร เกียรติพิงพร . (2553) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลได้และค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบเฉพาะของน้ำมันชีวภาพแต่ละชนิดและค่าความเป็นกรด -เบส ของถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสของไยปาล์ม เปลือกเมล็ดกาแฟ และไม้ยูคาลิปตัส โดยนำชีวมวลมาบด อนุภาคเป็นชิ้นเล็กๆ อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ นำมาผ่าน กระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิช่วง 450-550 องศาเซลเซียส มีอัตราการ ไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งของเหลว ถ่าน และแก๊ส ซึ่งการไพโรไลซิสไยปาล์ม เปลือกเมล็ดกาแฟ และไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละ ผลได้ของของเหลวมากที่สุดเป็น 39.8 42.8 และ 47.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเทียบผลได้ ของของเหลวทั้ง 3 ชนิดไม้ยูคาลิปตัสให้ค่าผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด อีกทั้งได้ร้อยละผลได้ของถ่านเป็น 33.5 32.1 และ 29.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และได้ร้อยละผลได้ของแก๊สเป็น 26.7 25.1 และ 23.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของของเหลวด้วยเครื่องบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ พบว่าค่าความร้อนของเฟสน้ำมันสูงกว่าเฟสน้ำ และเฟสน้ำมันของไยปาล์มให้ค่าความร้อน มากที่สุดเป็น 28.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ของเหลว และค่าความเป็นกรดทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง pH meter ของถ่านที่ได้จากการ ไพโรไลซิสไยปาล์มมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 10.3 เปลือกเมล็ดกาแฟ และไม้ ยูคาลิปตัส เท่ากับ 7.5 และ 9.8 ตามลำดับ ดังนั้นไยปาล์มและไม้ยูคาลิปตัสเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็น พลังงานทางเลือกใหม่ในการผลิตเชื้อเพลิงได้

Huiyan Zhang; et.al. (2011) ศึกษาประสิทธิภาพผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบ เร็วของซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบดภายใต้สภาวะบรรยากาศแก๊สตัวพา ได้แก่ ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน และวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ และเคมี โดยนำซังข้าวโพดมาบดให้มีขนาดอนุภาค 1.0 ถึง 2.0 มิลลิเมตร ลดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสภาวะน้ำหนักคงที่ แล้วป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ พบว่าผลได้ของซัง ข้าวโพดภายใต้สภาวะบรรยากาศแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ได้ปริมาณของของเหลวต่ำที่สุด ร้อยละ 49.6 เมื่อเทียบกับแก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนที่ได้ปริมาณร้อยละ 57.1 55.3 58.7 และ 56.4 ตามลำดับ เมื่อทำการไพโรไลซิสในแบบที่ไม่มีการควบแน่นภายใต้สภาวะ บรรยากาศแก๊สมีเทน ได้ปริมาณแก๊สต่ำที่สุดร้อยละ 11.3 เมื่อเทียบกับแก๊สไนโตรเจน แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ได้ปริมาณร้อยละ 13.6 15.7 21.2 และ 16.5 ตามลำดับ และที่บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์น้อยกว่าบรรยากาศแก๊ส อื่นๆ และส่วนประกอบเคมีหลักที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีกรดอะซิติกมากกว่าบรรยากาศอื่นๆ พ บ Fulfural สูงถึง 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแก๊สไฮโดรเจนที่มี 5.5 เปอร์เซ็นต์และแก๊สมีเทนประกอบด้วย 1,6-anhydro-beta-D-glucopyranose และแก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ประกอบด้วย 2,3-dihydro benzofuran น้อยและ 1,1 dimethoxypropane 2,3-dihydroxy-propanoic acid และ acetic acid มาก และค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพภายใต้สภาวะ บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน มีเพียง 17.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊ส ไฮโดรเจนมากกว่าเป็น 23.7 และ 24.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

C.E. Greenhalf; et.al. (2013) ศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลและเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก การไพโรไลซิสแบบเร็วของฟางข้าว ต้นหญ้า หญ้ามีสแอนทัส willow SRC และไม้บีช ในเครื่องปฏิกรณ์ แบบฟลูอิดไรซ์แบบฟองอากาศ นำชีวมวลบดอนุภาคให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร เพื่ออบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ

80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 36 ชั่วโมง และกักเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำการวิเคราะห์การย่อยสลาย ชีวมวลด้วยความร้อนโดยเครื่องมือ TGA โดยการป้อนชีวมวล 3 มิลลิกรัม ถูกให้อุณหภูมิจนถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 25 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊สไนโตรเจน 30 มิลลิตรต่อนาที พบว่าชีวมวลมีอัตราสูงสุดของการย่อยสลายทางความร้อนเกิดขึ้น ระหว่างอุณหภูมิ 339 องศาเซลเซียส และ 392 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีอัตราการย่อยสลาย ทางความร้อนสูงสุดต่ำ และเกิดอุณหภูมิสูง วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี โดย องค์ประกอบของชีเอ็ก ทำการป้อนชีวมวล 2 กรัมที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นระยะ เวลา 6 ชั่วโมง ค่าความชื้นด้วยการนำชีวมวล 1 กรัม ลดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ผล วิเคราะห์ได้ค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง วิเคราะห์องค์ประกอบหลักของคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจนด้วยร้อยละโดยน้ำหนัก และออกซิเจนพิจารณาจากการคำนวณและวิเคราะห์ค่าความร้อน พบว่า การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไม้เนื้อแข็ง มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงสุด และออกซิเจนต่ำสุด การ วิเคราะห์แบบประมาณ มีองค์ประกอบของส ารระเหยง่ายสูงสุด 85.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รวมทั้งให้ ค่าความชื้นและชีเอ็กต่ำสุดเป็น 4.24 และ 0.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และให้ค่าความร้อนสูง เมื่อนำชีวมวล 3 มิลลิกรัมป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์แบบฟองอากาศ ที่มีอุณหภูมิการ ไพโรไลซิส 520 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อมิลลิวินาที ภายใต้การป้อนแก๊ส ไนโตรเจนกับทรายที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 710-850 ไมโครเมตร ป้อนในปริมาณ 1 กิโลกรัม ได้ผลิตภัณฑ์ เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส พบว่าไม้ปืให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีว ภาพสูงสุด เมื่อ วิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ด้วยเครื่อง gas chromatography – mass spectrometry พบว่าต้นหญ้าให้ ร้อยละผลได้สูงสุดของ furfural 0.571 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของ 2-furanmethanol 0.183 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของ levoglucosan 0.728 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รวมทั้งให้ ร้อยละผลได้ของ 1,2 benzenediol 0.265 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 2-methoxy-4-vinylphenol 0.375 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ willow SCR ให้ร้อยละผลได้สูงสุดของ phenol เป็น 0.325 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ค่าคว ามร้อนในการไพโรไลซิส พบว่าน้ำมันชีวภาพจากต้นหญ้า ให้ค่าความร้อน สูงสุดเป็น 22.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

A. Veses; et.al. (2014) ศึกษาประสิทธิภาพคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของของเหลวจากการ ไพโรไลซิสชีวมวลที่มีองค์ประกอบแคลเซียมด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบส่วานของชีวมวลไม้ กับทรายเป็นตัวให้ ความร้อน และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง CaO และ CaO-MgO โดยนำเปลือกไม้มาบดอนุภาคให้มีขนาดมากที่สุด 15 มิลลิเมตร อบไล่ความชื้นให้ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ได้รับค่าความร้อนต่ำ (lower heating value: LHV) เป็น 18.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม จากนั้นทำการป้อนชีวมวลที่มีขนาดอนุภาค 300-600 ไมโครเมตร ทราย ซิลิกาที่มีขนาดประมาณ 200-600 ไมโครเมตร และสารเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (Dolomite) โดยแบ่งการ ทดลองเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ 1.) ชีวมวลกับซิลิกา 2.) ชีวมวลกับซิลิกาและ CaO และ 3.) ชีวมวลกับซิลิกา และ CaO-MgO ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบส่วานที่มีอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหล ของชีวมวล 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 5 ลิตรต่อนาที ชีวมวลได้รับความร้อนเป็นเวลา 7 นาที ซึ่งทำการทดลองเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อย ให้สภาวะคงที่เป็นเวลา 45 นาที พบว่าได้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของของเหลวร้อยละ 48-50 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 25-27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแก๊สร้อยละ 26-27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ

เมื่อทำการวิเคราะห์การไพโรไลซิสด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพเพิ่มมากขึ้น ทั้งองค์ประกอบของออกซิเจนและค่าความเป็นกรดลดน้อยลง ในขณะที่ให้ค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

Melisa Bertero; et.al. (2014) มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูป พืชทางเกษตร ได้แก่ เปลือกหุ้มเมล็ดผล chanar (*Geoffroea decorticans*) กากปาล์ม และกากเมล็ดในผลปาล์ม ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตรา 15 องศาเซลเซียส ต่อนาที จนถึงสภาวะคงที่ (Steady State) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยของแข็ง หรือถ่านชาร์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน และของเหลวเป็นน้ำมันชีวภาพ และกากยางเหนียวโดยพบว่าให้ร้อยละผลได้ที่เป็นของเหลว 35-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเปลือกหุ้มเมล็ดผล chanar มีร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด 47 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกากเมล็ดในผลปาล์มมีร้อยละของกากยางเหนียวสูงที่สุด 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ พบว่าน้ำมันชีวภาพจากเปลือกหุ้มเมล็ด chanar มีองค์ประกอบที่เป็นกรด 17.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 1.24 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เดซิเมตร และสารประกอบไนโตรเจน 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลมีศักยภาพใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนและเชื้อเพลิง หรือสารประกอบทาง เคมีที่มีคุณค่าใช้ได้ต่อไป

S.I. Yang; et.al. (2014) ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพด้วยการย่อยสลายทางความร้อนของชีลี้อยู่ต้นชีดาร์ กากเมล็ดกาแฟ และฟางข้าว ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลภายใต้สภาวะความร้อนที่ 1 5 10 เคลวินต่อนาทีด้วยเครื่อง thermogravimetric analysis (TGA) แล้วทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีอัตราการป้อนแก๊สตัวพา 30 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน ได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยของแข็งหรือถ่านชาร์ แก๊ส และของเหลวเป็น น้ำมันชีวภาพ และกากยางเหนียว พบว่าให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากชีลี้อยู่ต้นชีดาร์ กากเมล็ดกาแฟ และฟางข้าว เป็น 51 48 และ 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพและกากยางเหนียวด้วย เครื่อง gas chromatography – mass spectrometry พบว่ากากยางเหนียว ประกอบด้วย สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว อะลิฟาติก อะโรมาติก และ สารประกอบอินทรีย์ที่มีขั้ว และน้ำมันชีวภาพ ประกอบด้วย อะโรมาติก และ สารประกอบออกซิเจน เช่น กรดคาร์บอกซิลิก ฟีนอล และคีโตน และพบว่าการใช้ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สตัวพาสามารถเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ได้ดีเท่ากับแก๊สตัวพาของไฮโดรเจน

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินการทดลอง

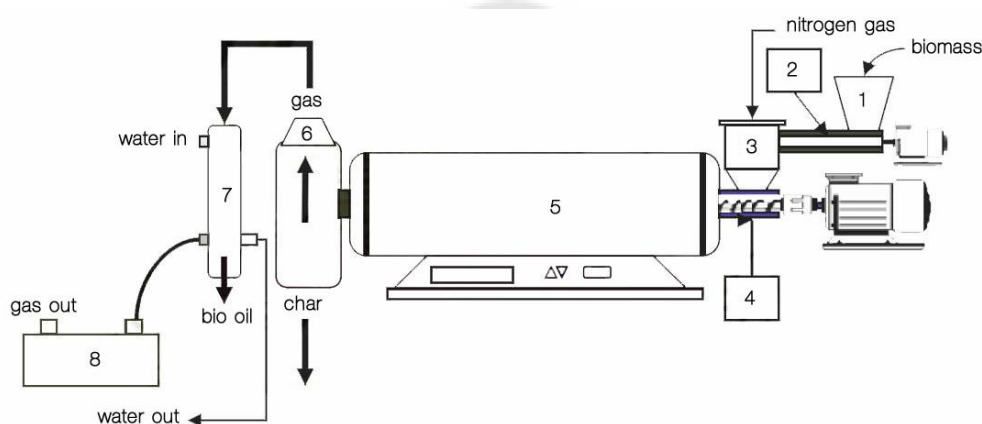
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เครื่องบดชีวมวล

3.1.2 เตาอบ

3.1.3 ตะแกรงร่อน

3.1.4 ชุดอุปกรณ์การทดลองไพโรไลซิสเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องมีสกรูด้านล่างสำหรับ
ขับเคลื่อนสารตั้งต้น แสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

❶ ตัวเก็บสาร (Hopper 1) ❷ ตัวเก็บสาร (Hopper 2) ❸ ชุดสกรู (Screw feeder 1) ขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ❹ ชุดสกรู (Screw feeder 2) ขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ❺ เตาเผา (Tube furnace) ❻ ตัวแยกสาร (Separator) ❼ ตัวควบแน่นสาร (Condenser) ❽ ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

3.1.5 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพิจารณาพฤติกรรมและการสลายตัวด้วยความร้อน

3.1.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

3.1.7 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscoph (FT-IR) เป็นเครื่องมือใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.1.8 เครื่องโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (H^1 -NMR) เป็นเครื่องมือใช้วิเคราะห์จำนวนโปรตอนในโครงสร้างพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ

3.1.9 เครื่องไทเทรชันแบบอัตโนมัติ (automate titration) รุ่น 848 Titrino plus

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 เศษไม้กระถินณรงค์

3.2.2 แก๊สไนโตรเจน จากบริษัท TIG Trading จำกัด

3.2.3 แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

3.2.4 โทลูอิน (commercial grade: Merck)

3.2.5 ตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Lab grade: Merck)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบเชิงวิศวกรรมแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken design) เป็นการออกแบบโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง เป็นการออกแบบการทดลองแบบพิตแบบจำลองกำลังสองและนำไปวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง เพื่อใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกันหลายปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสาร ในแต่ละปัจจัยประกอบด้วย การทดลองแบบ 2 ปัจจัยที่เพิ่มจุดกึ่งกลาง คือ ระดับสูง (+) ระดับกลาง (0) และระดับต่ำ (-) สามารถใช้ Response optimize ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีผลและผลตอบที่ดีที่สุดตามลำดับ แสดงได้ดังตาราง 8-9

ตาราง 8 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาลิทธิภพน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์

ปัจจัย	ระดับ		
	ระดับต่ำ (-)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+)
A อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	380	415	450
B อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)	80	120	160
C ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	1	3	5
D อัตราการป้อนสาร (รอบต่อนาที)	120	240	360

ตาราง 9 การออกแบบการทดลองแบบฟ็อกซ์-เบนเคน

Std	Run	Tem (°C)	N ₂ flow (cm ³ /min)	MgO (%w/w)	Screw rate (rpm)
12	1	450	120	3	360
5	2	415	120	1	120
16	3	415	160	5	240
29	4	415	120	3	240
19	5	380	120	5	240
1	6	380	80	3	240
3	7	380	160	3	240
7	8	415	120	1	360
18	9	450	120	1	240
4	10	450	160	3	240
25	11	415	120	3	240
26	12	415	120	3	240
15	13	415	80	5	240
9	14	380	120	3	120
8	15	415	120	5	360
13	16	415	80	1	240
6	17	415	120	5	120

ตาราง 9 (ต่อ)

Std	Run	Tem (°C)	N ₂ flow (cm ³ /min)	MgO (%w/w)	Screw rate (rpm)
21	18	415	80	3	120
28	19	415	120	3	240
22	20	415	160	3	120
14	21	415	160	1	240
24	22	415	160	3	360
2	23	450	80	3	240
20	24	450	120	5	240
27	25	415	120	3	240
10	26	450	120	3	120
17	27	380	120	1	240
23	28	415	80	3	360
11	29	380	120	3	360

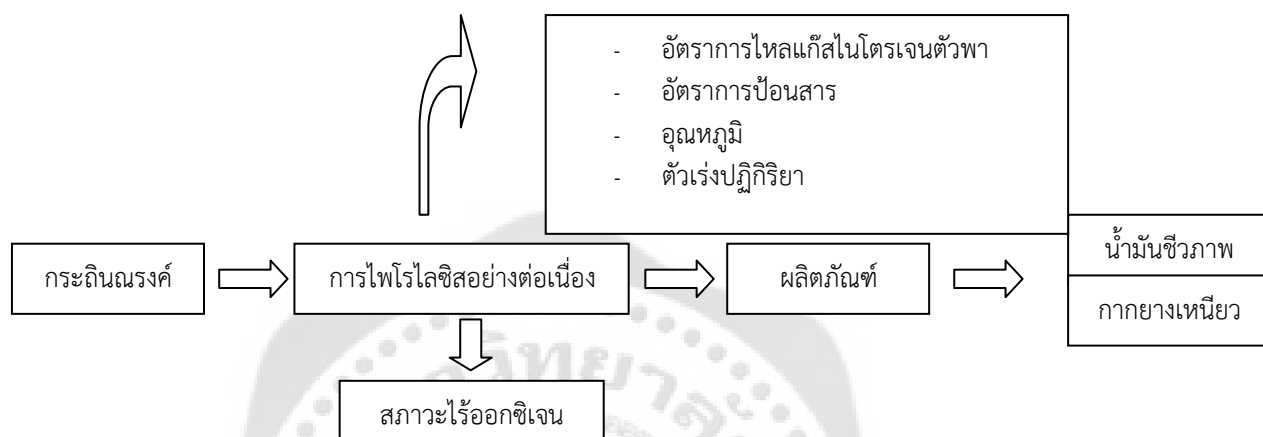
3.3.2 เตรียมวัตถุดิบ

- นำเศษไม้กระถินณรงค์มาบดอนุภาคให้มีขนาดอนุภาค 500 - 850 ไมโครเมตร คัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน
- อบกระถินณรงค์ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ให้มีความชื้นน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วเก็บไว้ในตู้อบความชื้น
- นำกระถินณรงค์มาวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis)
- พิจารณาสภาพเริ่มต้นของอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของกระถินณรงค์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA)

3.3.3 การทดลอง

- นำวัตถุดิบเศษไม้กระถินณรงค์ที่ร่อนคัดแยกขนาดชั่งน้ำหนัก 300 กรัม เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์บรรจุในถังเก็บสาร
- เปิดแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เพื่อทำการไล่อากาศภายในออกจากระบบเป็นเวลา 30 นาที ให้อยู่ในภาวะไร้ออกซิเจน
- เปิดเครื่องให้ความร้อนโดยตั้งอุณหภูมิตามที่อุณหภูมิการทดลองจนอุณหภูมิคงที่

- เริ่มเปิดระบบให้สกรูนำเศษไม้กระถินณรงค์ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ตามลำดับปรับความเร็วของสกรูเพื่อทำการป้อนสาร แล้วเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อไล่สารระเหยง่ายที่เกิดจากการไพโรไลซิสผ่านเข้าสู่เครื่องควบแน่น
- เก็บตัวอย่างน้ำมันชีวภาพที่ได้ด้วยการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก
- ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อศักยภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนตัวพา



3.3.4 วิเคราะห์ผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากการทดลอง

3.3.4.1 วิเคราะห์ร้อยละและค่าการเลือกเกิด (selectivity) ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมทางสถิติ ANOVA ดังนี้

- ทำการป้อนค่าตัวแปรตอบสนองที่ต้องการวิเคราะห์
- ใช้ ANOVA แสดงเป็นตารางที่สามารถวิเคราะห์ได้
- ทำการวิเคราะห์ให้ครบทุกตัวแปรตอบสนอง
- กำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการโดยเลือกให้มีค่าสูงสุด
- ใช้โปรแกรมทำการคำนวณเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม และได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพกับปัจจัยที่มีผล

3.3.4.2 นำผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากข้อ 3 มาทำการทดลองซ้ำ

3.3.4.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

- วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วย Gas Chromatography (GC-MS)
- วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR spectroscopy
- การวิเคราะห์จำนวนโปรตอนในโครงสร้างพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ (H^1 -NMR)

3.3.4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

- วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไฟโวลซิพิเศษไม้กระถินณรงค์ให้เป็นน้ำมันชีวภาพที่มีองค์ประกอบทางเคมี ทางกายภาพ และสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องมีสกรูด้านล่าง หาสมภาวะที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพปริมาณสูงสุด และ ร้อยละของสมบัติของเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด โดยปัจจัยสำหรับการทดลอง คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และอัตราการป้อนสาร โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมช่วยในการตัดสินใจเลือกตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ และร้อยละการเลือกเกิดไปเป็นน้ำมันชีวภาพ จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเชื้อเพลิง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติพิเศษไม้กระถินณรงค์

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของเศษไม้กระถินณรงค์

การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาสมบัติทางกายภาพของชีวมวล ได้แก่ ความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และขี้เถ้า เพื่อบ่งบอกลักษณะและองค์ประกอบอย่างคร่าวๆ ทำการวิเคราะห์แบบประมาณตามวิธี (ASTM D3172–D3175) ในขณะที่การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาส่วนประกอบของธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุตามวิธี (ASTM D3176) จากตาราง 10 แสดงส่วนประกอบต่างๆของเศษไม้กระถินณรงค์ที่นำมาใช้ในการทดลอง เมื่อวิเคราะห์แบบประมาณ พบว่าประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 7.03 สารระเหยง่ายร้อยละ 74.65 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 19.05. และขี้เถ้าร้อยละ 0.70 และเมื่อวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของเศษไม้กระถินณรงค์ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.12 ไฮโดรเจนร้อยละ 5.92 ไนโตรเจนร้อยละ 0.21 และออกซิเจนร้อยละ 46.75 แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างเศษไม้กระถินณรงค์ประกอบด้วยสารระเหยง่าย (volatiles matter) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเกิดการแตกสลายด้วยความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน จึงมีโอกาสดังกล่าว (thermal degradation) และกลั่นตัวเป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

ตาราง 10 การวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ**

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น (moisture)	7.03
สารระเหยง่าย (volatiles matter)	74.65
คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)	19.05
ขี้เถ้า (ash)	0.70

ตาราง 10 (ต่อ)

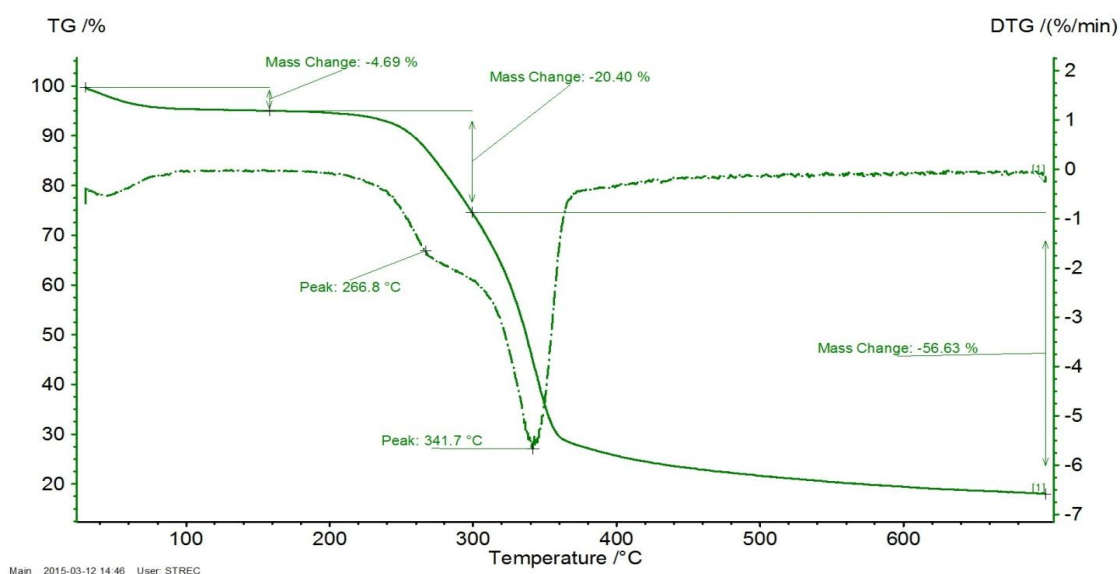
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
คาร์บอน (C)	47.12
ไฮโดรเจน (H)	5.92
ไนโตรเจน (N)	0.21
ออกซิเจน (O) ***	46.75

**จากการทดลอง ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

***จากผลต่าง (by different)

4.1.2 การวิเคราะห์การแตกสลายเศษไม้กระถินณรงค์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิมิเตอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA)

การวิเคราะห์การแตกสลายเชิงความร้อน (thermal gravimetric analysis: TGA) เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในอัตราความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกสลายในช่วงอุณหภูมิต่างๆ โดยเมื่อนำเศษไม้กระถินณรงค์มาทำการแตกสลายเชิงความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิมิเตอร์ภายใต้ความดันบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงในภาพประกอบ 16 พบว่าเศษไม้กระถินณรงค์ที่อุณหภูมิช่วง 266.8-375 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวมาก ที่อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 266.8 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการสลายที่อัตราการสลายสูงสุด 341.7 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์การแตกสลายเชิงความร้อน ทำให้สามารถ บ่งบอกองค์ประกอบของชีวมวล (Mohan D; et al. 2006: 851-852) ได้เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 58.18 และลิกนินร้อยละ 14.2



ภาพประกอบ 16 การแตกสลายเชิงความร้อนของเศษไม้กระถินณรงค์

ตาราง 11 ส่วนประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักของเศษไม้กระถินณรงค์*

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยมวล
เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส	58.18
ลิกนิน	14.2

*จากการคำนวณอ้างอิงตาม (Mohan D; et al. 2006: 851-852)

4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRF แสดงในตาราง 12

ตาราง 12 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์*

Magnesium oxide (Element)	Compound	Concentration (%weight)
Mg	MgO	99.64
S	SO ₃	0.03
Ca	CaO	0.33

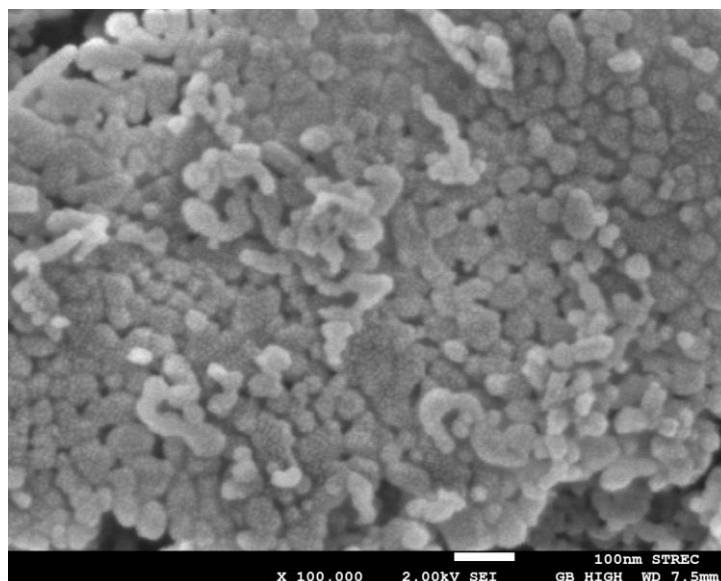
*จากการทดลอง: วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี

ตาราง 12 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ด้วยเทคนิค XRF พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย ออกไซด์ของแมกนีเซียมร้อยละ 99.64 โดยน้ำหนัก

4.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmelt และ Teller: BET เพื่อหาพื้นที่ผิวรูพรุน ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะมีผลต่อการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา โดยงานวิจัย (Witchakorn. 2004) บ่งชี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทวิธพันธ์ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนเป็นจำนวนมาก จะเกิดปฏิกิริยาส่งเสริมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) ด้วยการเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนผ่านพื้นที่ผิว (hydrogen transfer) และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) และเกิดปฏิกิริยาค่าการเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ (shape selectivity) เมื่อนำแมกนีเซียมออกไซด์ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) แสดงให้เห็นว่า

แมกนีเซียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด มีลักษณะพื้นที่ผิวเรียบ มีพื้นที่ผิวรูพรุนเป็นจำนวนมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tani (2011) แสดงในภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ลักษณะแมกนีเซียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

นำตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ไปหาพื้นที่ผิว BET แสดงได้ดังตาราง 13

ตาราง 13 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์*

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S_{BET}) (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
แมกนีเซียมออกไซด์	31.58	0.106

*จากการทดลอง: วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี

ตาราง 13 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ 31.58 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรผิวเท่ากับ 0.106 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

4.3 ร้อยละผลได้ของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken design) เป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยที่เพิ่มจุดกึ่งกลาง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์หลักน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเศษไม้กระถินณรงค์ที่มีขนาดอนุภาค 500-850 ไมโครเมตร และศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา ตัวเร่ง ปฏิกิริยา และอัตรา การป้อนสาร สำหรับการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน ซึ่งจากงานวิจัยส่วนใหญ่ พบว่าผลได้ของ ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของเหลวเป็นน้ำมันชีวภาพ แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามสภาวะทดลองใน ตาราง 14

ตาราง 14 ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเศษไม้กระถินณรงค์

Std	Run	Tem (°C)	N ₂ flow (cm ³ /min)	MgO (%w/w)	Screw rate (rpm)	solid(%)	gas(%)	bio-oil (%)
12	1	450	120	3	360	27.80	27.74	33.73
5	2	415	120	1	120	28.94	23.40	37.20
16	3	415	160	5	240	30.24	39.98	25.16
29	4	415	120	3	240	32.04	29.02	32.88
19	5	380	120	5	240	43.85	21.31	26.20
1	6	380	80	3	240	43.99	24.47	25.46
3	7	380	160	3	240	52.16	30.46	16.14
7	8	415	120	1	360	40.54	25.82	29.02
18	9	450	120	1	240	34.59	8.39	43.20
4	10	450	160	3	240	18.89	38.24	34.55
25	11	415	120	3	240	33.95	31.58	30.94
26	12	415	120	3	240	46.62	33.80	19.33
15	13	415	80	5	240	26.27	32.16	38.20
9	14	380	120	3	120	42.82	16.06	37.38
8	15	415	120	5	360	34.32	37.45	25.73
13	16	415	80	1	240	31.90	47.92	18.83
6	17	415	120	5	120	47.56	26.01	21.35
21	18	415	80	3	120	36.70	37.20	24.60
28	19	415	120	3	240	43.20	33.97	20.64

ตาราง 14 (ต่อ)

Std	Run	Tem (°C)	N ₂ flow (cm ³ /min)	MgO (%w/w)	Screw rate (rpm)	solid(%)	gas(%)	bio-oil (%)
22	20	415	160	3	120	29.52	17.86	46.06
14	21	415	160	1	240	43.83	36.47	18.48
24	22	415	160	3	360	41.03	40.89	16.44
2	23	450	80	3	240	41.78	6.50	46.95
20	24	450	120	5	240	28.88	39.52	28.90
27	25	415	120	3	240	38.93	34.09	24.03
10	26	450	120	3	120	47.73	15.63	29.02
17	27	380	120	1	240	63.86	24.24	11.48
23	28	415	80	3	360	35.14	43.26	21.70
11	29	380	120	3	360	64.21	22.05	13.06

ตาราง 14 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊สของการทดลองทดสอบปัจจัยอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสารด้วยการไพโรไลซิสแบบไม่กระถิน ณ เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพอยู่ระหว่างร้อยละ 11.48-46.95 โดยน้ำหนัก และได้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากการใช้โปรแกรม design expert เวอร์ชัน 7.0.1 แสดงดังต่อไปนี้

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	21885.07	1	21885.07			
<u>Linear vs Mean</u>	<u>920.35</u>	<u>4</u>	<u>230.09</u>	<u>3.49</u>	<u>0.0222</u>	<u>Suggested</u>
<u>2FI vs Linear</u>	<u>681.78</u>	<u>6</u>	<u>113.63</u>	<u>2.27</u>	<u>0.0834</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic vs 2FI	53.69	4	13.42	0.22	0.9220	
Cubic vs Quadratic	665.51	8	83.19	2.72	0.1193	Aliased
Residual	183.22	6	30.54			
Total	24389.62	29	841.02			

"Sequential Model Sum of Squares [Type I]": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Test

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	1436.31	20	71.82	1.94	0.2743	Suggested
2FI	754.52	14	53.89	1.46	0.3866	Suggested
Quadratic	700.83	10	70.08	1.90	0.2816	
Cubic	35.33	2	17.66	0.48	0.6515	Aliased
Pure Error	147.89	4	36.97			

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	8.12	0.3675	0.2621	0.0416	2400.35	Suggested
2FI	7.08	0.6397	0.4395	-0.0471	2622.54	Suggested
Quadratic	7.79	0.6611	0.3223	-0.7040	4267.88	
Cubic	5.53	0.9268	0.6586	-1.1235	5318.37	Aliased

การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสมโดยใช้การ รอกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบนเคน ให้ผลการแสดงการคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสอง จากค่า p-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะเห็นว่าควรพิจารณาสมการแบบ 2FI เป็นสมการที่มีความเหมาะสมที่ได้รับการยอมรับเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับผลตอบสนอง ในขณะที่เดียวกันการทดสอบ Lack of Fit พบว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์แบบ 2FI เป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมที่จะสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ให้เข้ากับข้อมูล และจากค่า R-squared ที่มีค่ามากที่สุดโมเดล บ่งบอกความเหมาะสม และความสามารถในการอธิบายความแม่นยำของโมเดลที่สร้างขึ้น พบว่าสมการ 2FI มีความเหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับตัวแปรตอบสนองด้วยสมการ 2FI จะบอกได้ว่า ปัจจัยมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

ANOVA for Response Surface 2FI Model

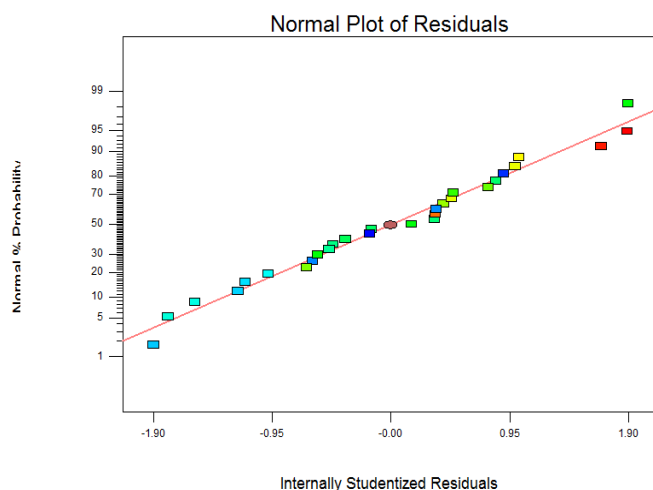
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1602.14	10	160.21	3.20	0.0155	significant
A-Tem	625.40	1	625.40	12.47	0.0024	
B-N2 flow	29.80	1	29.80	0.59	0.4507	
C-MgO	4.48	1	4.48	0.089	0.7685	
D-screw rate	260.68	1	260.68	5.20	0.0350	
AB	2.37	1	2.37	0.047	0.8303	
AC	210.54	1	210.54	4.20	0.0553	
AD	210.69	1	210.69	4.20	0.0552	
BC	40.26	1	40.26	0.80	0.3820	
BD	178.49	1	178.49	3.56	0.0754	
CD	39.44	1	39.44	0.79	0.3868	
Residual	902.41	18	50.13			
Lack of Fit	754.52	14	53.89	1.46	0.3866	not significant
Pure Error	147.89	4	36.97			
Cor Total	2504.55	28				
Std. Dev.	7.08		R-Squared	0.6397		
Mean	27.47		Adj R-Squared	0.4395		
C.V. %	25.77		Pred R-Squared	-0.0471		
PRESS	2622.54		Adeq Precision	7.568		

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดสอบสถานะที่เหมาะสม พบว่าโมเดลค่า F ที่ 3.20 แสดงค่าโมเดลส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ มีโอกาสเพียงร้อยละ 1.55 ที่โมเดลค่า F จะมาก ซึ่งสามารถเกิดขึ้นเนื่องจาก noise ในกรณีนี้ความน่าจะเป็นค่า F ของโมเดลต่างๆน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าเป็นโมเดลที่ส่งผล ดังนั้น A,D จึงเป็นตัวแปรที่ส่งผล และค่า F ของโมเดลได้ Lack of Fit 1.46 บ่งบอกว่าไม่ส่งผล แสดงว่าโมเดลมีความน่าเชื่อถือ และสัดส่วนระหว่างข้อมูลต่อ noise พบว่าค่า 7.568 เป็นค่าข้อมูล ที่มีความน่าเชื่อถือ

Design-Expert® Software
Bio-oil

Color points by value of
Bio-oil:
46.95
11.48

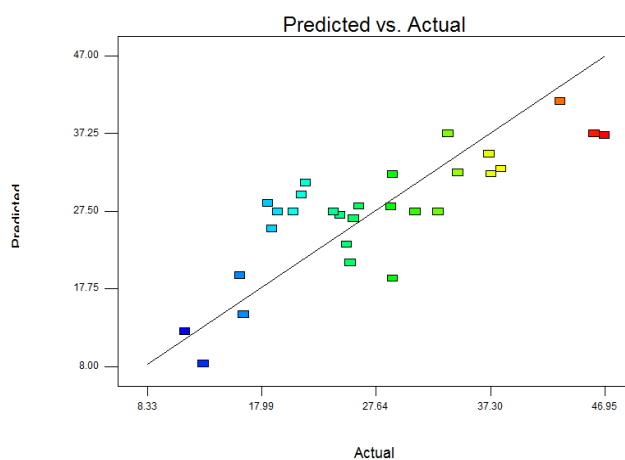


ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Normal % Probability พล็อตกับ Internally Studentized Residuals

เป็นการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล พบว่าจากกราฟแสดงแผนภาพเป็นมุมง่ย ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสม

Design-Expert® Software
Bio-oil

Color points by value of
Bio-oil:
46.95
11.48

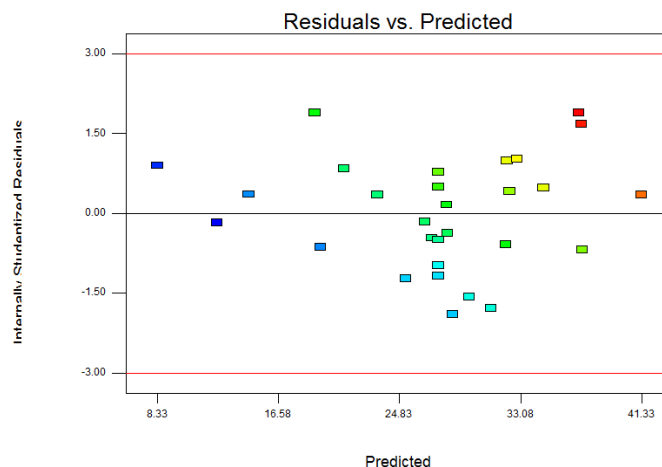


ภาพประกอบ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Predicted พล็อตกับ Actual

เป็นการตรวจสอบสมมติฐานความเป็นปกติ พบว่าจากกราฟเส้นที่พลอตมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีการกระจายตัวแบบ normal probability แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสม

Design-Expert® Software
Bio-oil

Color points by value of
Bio-oil:
46.95
11.48

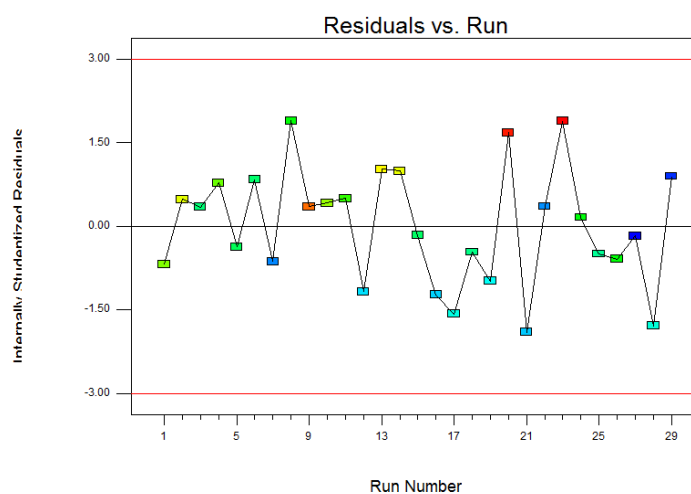


ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Internally Studentized Residuals
พลอตกับ Predicted

เป็นการตรวจสอบเสถียรภาพความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าข้อมูลจากกราฟส่วนตกค้างมีการกระจายตัวทั้งทางบวกและทางลบ ทำให้ข้อมูลมีความเสถียรภาพความแปรปรวน

Design-Expert® Software
Bio-oil

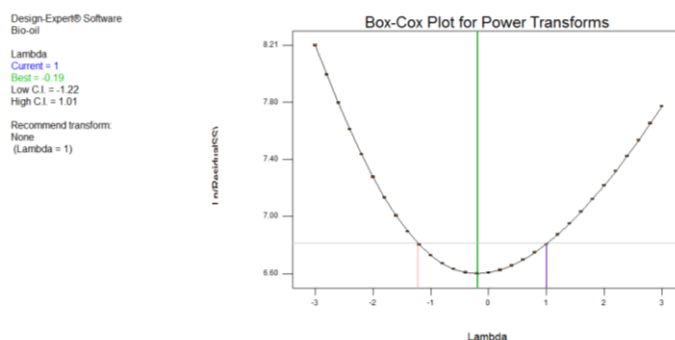
Color points by value of
Bio-oil:
46.95
11.48



ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Internally Studentized Residuals
พลอตกับ Run Number

เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าจากกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของจุดที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความอิสระ

ดังนั้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้างรูปแบบต่างๆทั้ง การกระจายแบบแจกแจงปกติ เสถียรภาพความแปรปรวน Predicted vs Actual และ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือที่ระดับนัยสำคัญ 0.95



ภาพประกอบ 22 การแปลงข้อมูลแบบบ็อกซ์-คอกซ์

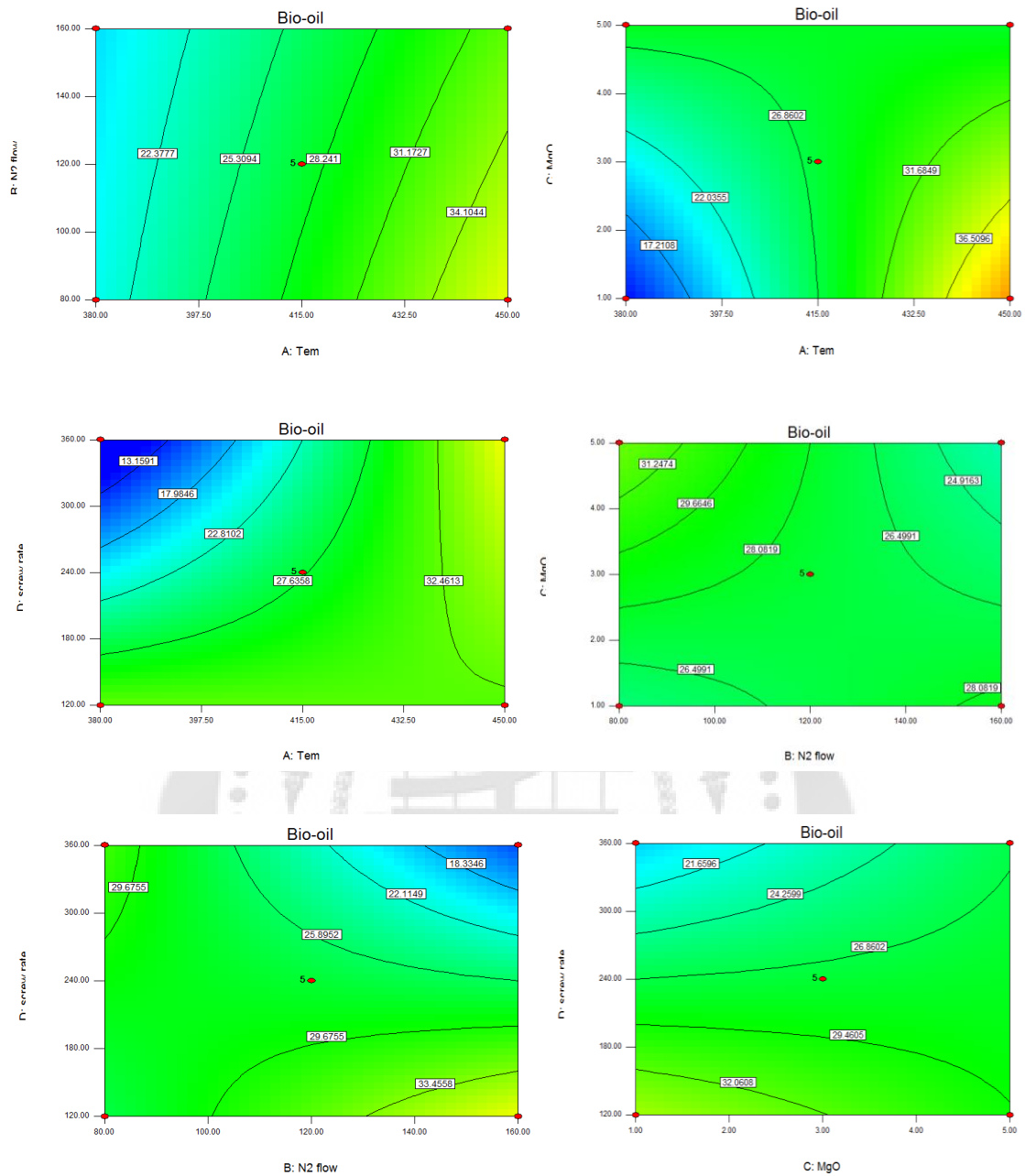
การวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองด้วยสมการ 2FI แสดงสัมประสิทธิ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปค่าเข้ารหัส และค่าความผิดพลาด แสดงได้ดังนี้

ตาราง 15 การวิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองด้วยสมการ 2FI

Coefficient	Standard	95% CI	95% CI			
Factor	Estimate	df	Error	Low	High	VIF
Intercept	27.47	1	1.31	24.71	30.23	
A-Tem	7.22	1	2.04	2.92	11.51	1.00
B-N ₂ flow	-1.58	1	2.04	-5.87	2.72	1.00
C-MgO	0.61	1	2.04	-3.68	4.91	1.00
D-screw rate	-4.66	1	2.04	-8.96	-0.37	1.00
AB	-0.77	1	3.54	-8.21	6.67	1.00
AC	-7.26	1	3.54	-14.69	0.18	1.00
AD	7.26	1	3.54	-0.18	14.70	1.00
BC	-3.17	1	3.54	-10.61	4.27	1.00
BD	-6.68	1	3.54	-14.12	0.76	1.00
CD	3.14	1	3.54	-4.30	10.58	1.00

รูปสมการค่าตัวแปรเข้ารหัส แสดงได้ดังสมการของการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพได้เป็น

$$\text{Bio-oil} = +27.47 + 7.22A - 1.58B + 0.61C - 4.66D - 0.77AB - 7.26AC + 7.26AD \\ - 3.17BC - 6.68BD + 3.14CD$$



ภาพประกอบ 23 การพลอตแบบคอนทัวร์

Design-Expert® Software

Desirability



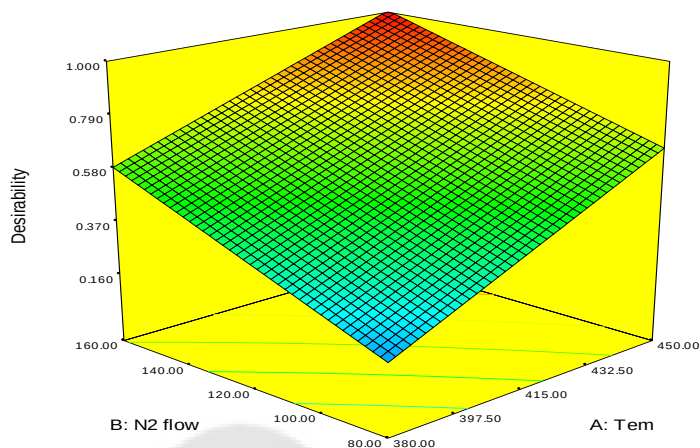
X1 = A: Tem

X2 = B: N2 flow

Actual Factors

C: MgO = 1.13

D: screw rate = 143.02

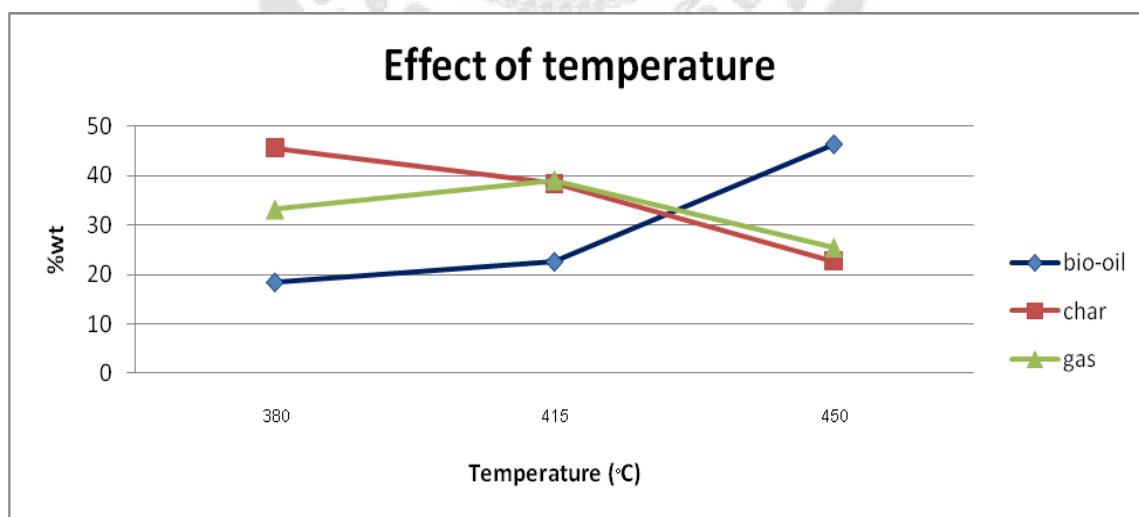


ภาพประกอบ 24 แผนภูมิสามมิติของสถานะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเศษไม้กระถินณรงค์ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 143.02 รอบต่อนาที ที่ใช้อุณหภูมิและอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ต่างกัน

4.4 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิสของเศษไม้กระถินณรงค์

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสาร

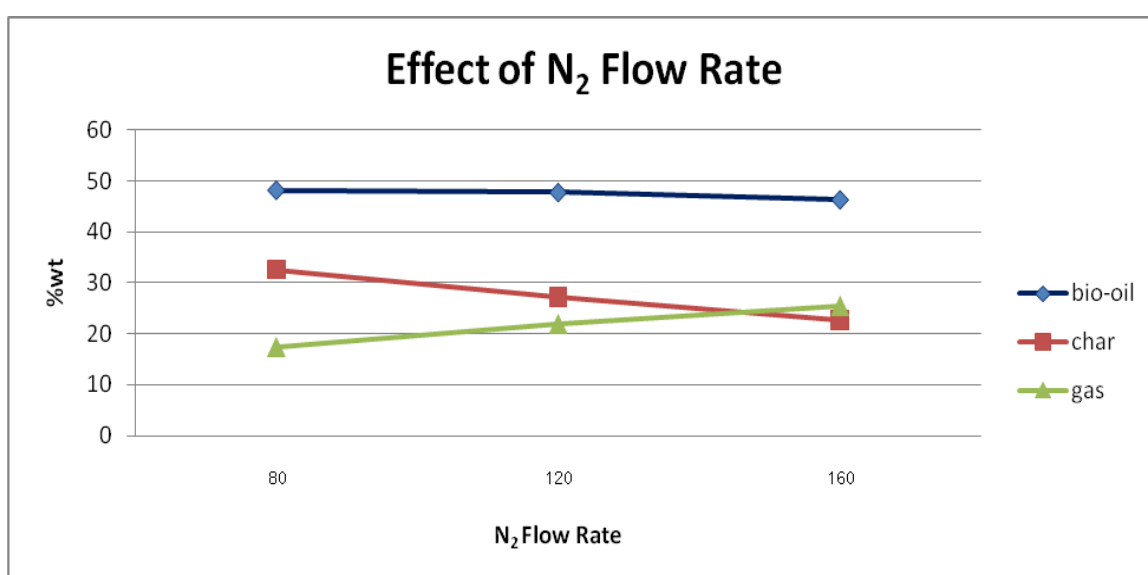
4.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อน้ำมันชีวภาพ



ภาพประกอบ 25 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของอุณหภูมิ 380 415 และ 450 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที

ภาพประกอบ 25 แสดงอุณหภูมิจากการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ เมื่ออุณหภูมิช่วง 380 องศาเซลเซียส ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว มีปริมาณน้อย ได้ผลิตภัณฑ์ชาร์สูงที่สุด และปริมาณร้อยละผลได้ของแก๊สน้อย เป็นผลจากความร้อนของระบบต่อการสลายตัวของเศษไม้กระถินณรงค์ที่ยังไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการไพโรไลซิสได้ไม่ดี ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์เกิดได้ดี ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากขึ้น จาก 18.35 เป็น 46.32 โดยน้ำหนัก ปริมาณร้อยละผลได้ของของแข็งน้อย จาก 45.62 เป็น 22.72 โดยน้ำหนัก

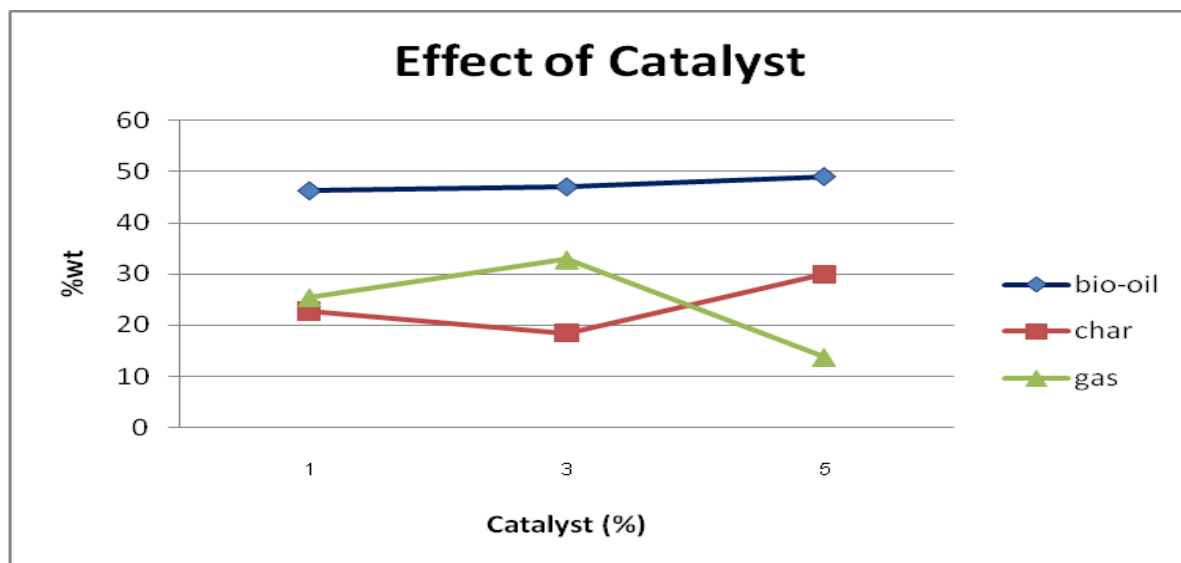
4.4.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อน้ำมันชีวภาพ



ภาพประกอบ 26 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 80 120 และ 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที

ภาพประกอบ 26 แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพาระหว่าง 80-160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากเครื่องกำเนิดความร้อนไปยังเศษไม้ชีวมวล ได้ไม่ดี ทำให้เวลาสัมผัสและการถ่ายโอนความร้อนไม่พอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้แก๊สไนโตรเจนยังมีบทบาทต่อการเกิดการ devolatilization ของเศษไม้ชีวมวล (H. Zhiquan et al. 2013: 122) ดังนั้นหากป้อนแก๊สไนโตรเจนในอัตราที่เร็วจะทำให้การเกิด devolatilization ไปเป็นน้ำมันชีวภาพเกิดได้ไม่ดี จึงมักต้องควบคุมอัตราการป้อนของแก๊สไนโตรเจนไม่ให้สูงมากเกินไป ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์ที่มีแนวโน้มลดลงจาก 48.20 เป็น 46.32 โดยน้ำหนัก เนื่องจากกระบวนการได้มีการนำพาสารระเหยง่ายออกจากระบบได้เร็วขึ้น จึงทำให้สารระเหยง่ายไม่สามารถควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพได้ทัน

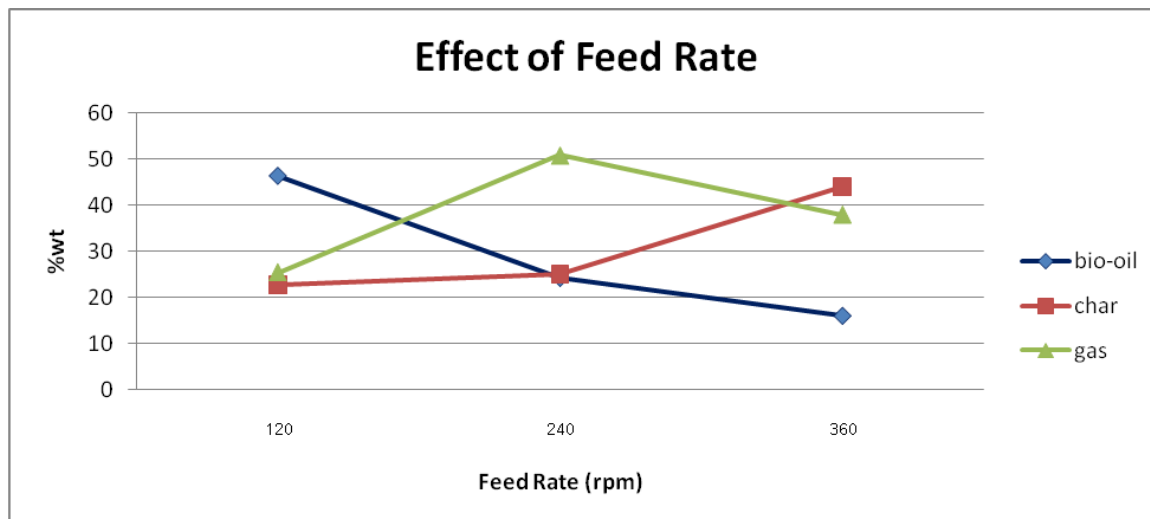
4.4.3 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อน้ำมันชีวภาพ



ภาพประกอบ 27 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที

ภาพประกอบ 27 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการไพโรไลซิสที่มีผลต่อ ร้อยละผลได้ของ น้ำมันชีวภาพสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Tani. 2011: 410-414) กล่าวไว้ว่าแมกนีเซียมออกไซด์ นอกจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสที่มีส่วนช่วยในการแตกตัวด้วยความร้อนและแตกตัวกับตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว อีกทั้งช่วย ปฏิกิริยา ดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) โดยเคลื่อนย้ายหมู่คาร์บอกซิลิก ให้เป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กับการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ จะให้ปริมาณแก๊สที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และทำให้มีความเป็นกรดลดลง เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพได้ปริมาณ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มมากขึ้น จาก 46.32 เป็น 49.08 โดยน้ำหนัก

4.4.4 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อน้ำมันชีวภาพ



ภาพประกอบ 28 ปริมาณร้อยละผลได้แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ของอัตราการป้อนสาร 120 240 และ 360 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก

ภาพประกอบ 28 แสดงผลของอัตราการป้อนสารจากกระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ เมื่ออัตราการป้อนสารต่ำเศษไม้กระถินณรงค์ได้สัมผัสความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้นและทั่วถึง เกิดการถ่ายโอนความร้อนและส่งเสริมการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal degradation) ในช่วงต้น และการเกิด (devolatile) ของเศษไม้เกิดไปเป็นไอ และกลั่นตัวเป็นน้ำมันชีวภาพ และเกิด การแตกตัวสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนสารเพิ่ม ทำให้เศษไม้กระ ถินณรงค์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนมายังเศษไม้ชีวมวลเกิดการไพโรไลซิสเป็นน้ำมันชีวภาพได้น้อย การแตกตัวจึงลดลง เกิดปฏิกิริยาเร็วเกินไปที่จะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว อีกทั้งส่งผลให้การกระจายตัวของสารได้ไม่ดี ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีแนวโน้มลดน้อยลง จาก 46.32 เป็น 15.99 โดยน้ำหนัก

4.5 ผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพที่สภาวะเหมาะสม

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องจาก การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์ -เบนเคน ที่มีขอบเขตการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม design expert แสดงในตาราง 16 โดยใช้เศษไม้กระถินณรงค์ขนาด 500 - 850 ไมโครเมตรในการทดลอง

ตาราง 16 ขอบเขตการหาสภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ -เบนเคนของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์โดยการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

Name	Goal	Lower limit	Upper limit	Unit
Temp	in the range	380	450	°C
N ₂ Gas	in the range	80	160	cm ³ /min
Feed rate	in the range	120	360	rpm
Catalyst	In the range	1	5	%
Bio-oil	maximize	11.48	46.95	%wt.

จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการพิจารณา ร้อย ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ชีวภาพที่มีอิทธิพลของตัวแปร คือ อุณหภูมิ 380-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 80-160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 1-5 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนชีวมวลโดยการปรับความเร็วรอบของสกรู 120-360 รอบต่อนาที เพื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่สูงที่สุดในการหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมแสดงตาราง 17

ตาราง 17 สภาวะที่เหมาะสมได้จากการคำนวณของโปรแกรม design expert ของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	สภาวะที่เหมาะสม (design-expert)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	447.39
อัตราการป้อนแก๊สตัวพาหรือแก๊สไนโตรเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)	158.64
ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (%โดยน้ำหนัก)	1.14
อัตราการป้อนสารชีวมวล (รอบต่อนาที)	132.47
ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	45.16

จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม design expert พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ได้น้ำมัน ชีวภาพ คือ อุณหภูมิ 447.39 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 158.64 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 1.14 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสารชีวมวล 132.47 รอบต่อนาที ให้ผลได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน ชีวภาพ 45.16 %โดยน้ำหนัก และจากสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองจริงด้วยการวิเคราะห์โปรแกรม design expert ผลที่ได้แสดงดังตาราง 18

ตาราง 18 สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	ภาวะที่เหมาะสม (design-expert)	ผลการทดลอง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	447.39	450
อัตราการป้อนแก๊สตัวพาหรือแก๊สไนโตรเจน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)	158.64	160
ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (%โดยน้ำหนัก)	1.14	1
อัตราการป้อนสารชีวมวล (รอบต่อนาที)	132.47	120
ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	45.16	46.32



ภาพประกอบ 29 ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบา

จากตาราง 18 ผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้ร้อยละ 45.16 %โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการทดลองซ้ำให้ร้อยละ 46.32 %โดยน้ำหนัก ต่างจากที่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

4.6.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพ

ตาราง 19 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพ

	เศษไม้กระถินณรงค์	น้ำมันเบ
คาร์บอน (%wt.)	47.12	14.31
ไฮโดรเจน (%wt.)	5.92	9.68
ไนโตรเจน (%wt.)	0.21	0.17
ออกซิเจน (%wt.)	46.75	75.84
H/C (mole/mole)	1.51	8.12
O/C (mole/mole)	0.74	3.97
H/O (mole/mole)	2.03	2.04
ค่าความร้อน (MJ/kg)	18.59	8.56

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันเบ แสดงค่า องค์ประกอบของธาตุ ดังตาราง 19 พบว่าน้ำมันเบมีค่าร้อยละของออกซิเจนสูง เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำมันเบมีสารประกอบออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่

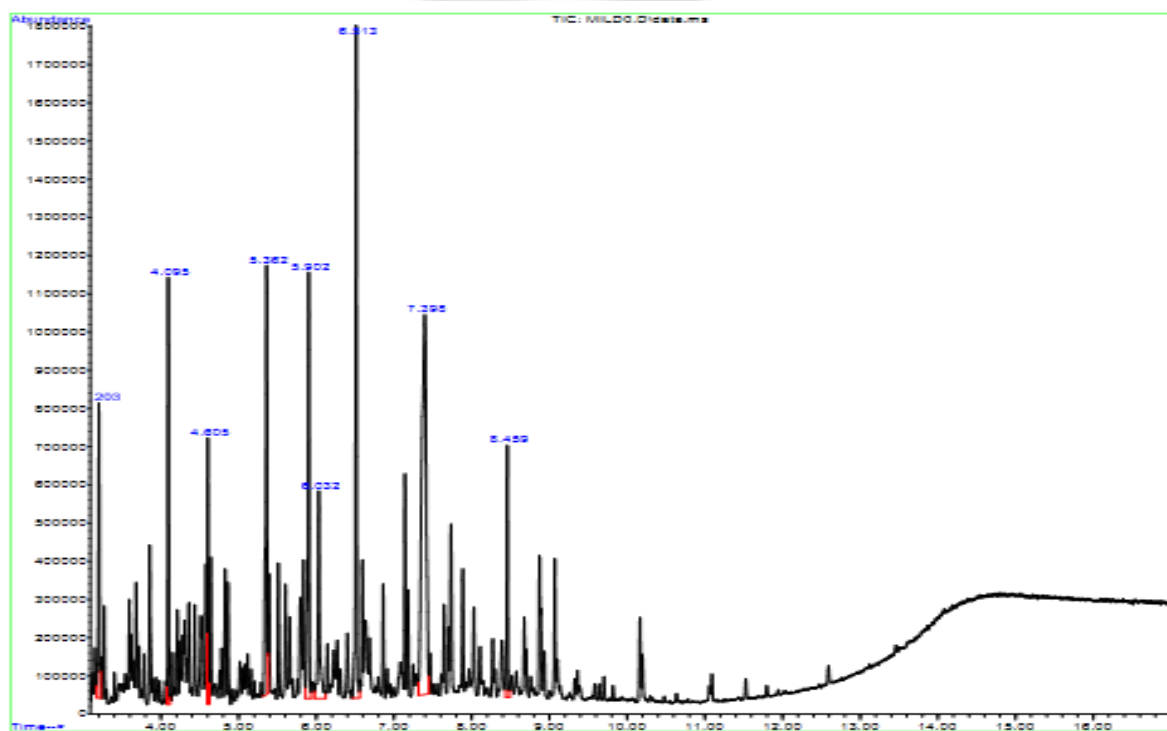
4.6.2 ค่าความเป็นกรด

นำน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเศษไม้กระถินณรงค์ไปหาค่าความเป็นกรดด้วยเครื่องไทเทรชันแบบอัตโนมัติ พบว่าให้ค่าความเป็นกรด 105.72 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม แสดงว่าน้ำมันชีวภาพยังมีค่าความเป็นกรดสูง ซึ่งหากนำไปใช้งาน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ ควรมีการนำไปปรับปรุงคุณภาพหรือลดสภาพความเป็นกรดก่อน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสเศษไม้กระถินณรงค์โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าความเป็นกรดสูงถึง 150 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม สอดคล้องกับงานวิจัยของวารินทร์ (2555) พบว่าการดีออกซิเจนชั้นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าความเป็นกรดลดลงจาก 150 เป็น 38.4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

4.7.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิค gas chromatography – mass spectrometry (GC-MS)

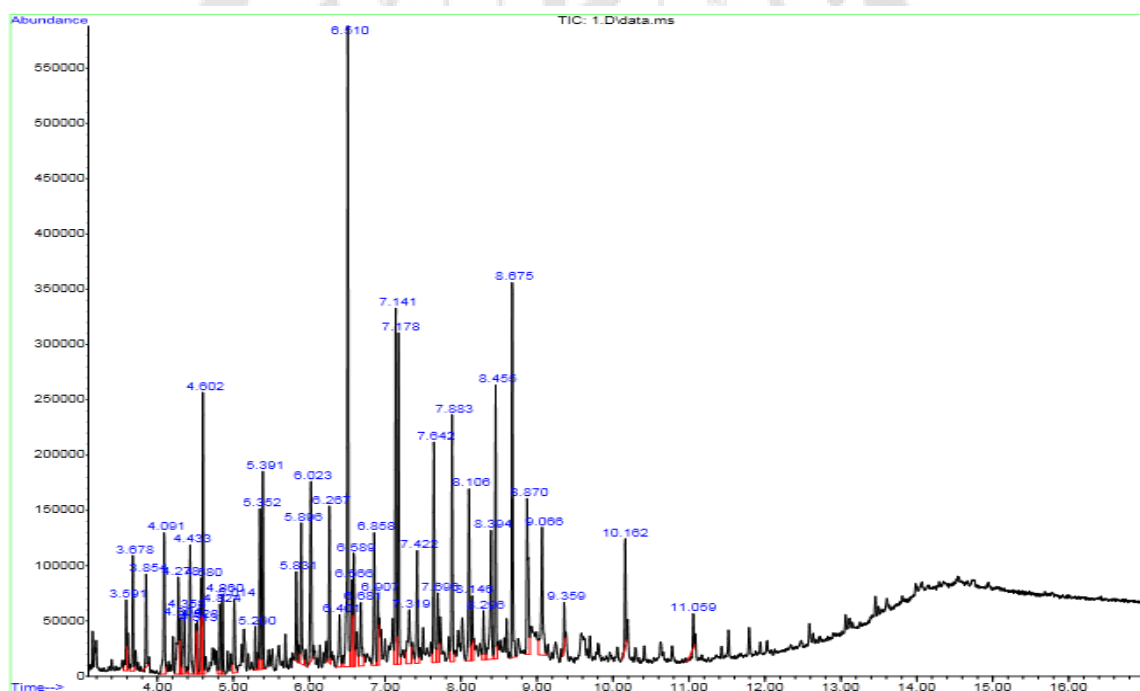
องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักจากเศษไม้กระถินณรงค์ สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์โดยอ้างอิงมาตรฐาน National Institute of Standard and Technology (NIST) ดังภาพประกอบ 30 และ 31 และตาราง 20 และ 21 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมัน เบาประกอบด้วย กลุ่มคีโตนให้ร้อยละ 14.41 ฟีนอลที่เป็นอนุพันธ์ของเบนซีนให้ร้อยละ 49.22 น้ำตาลให้ร้อยละ 31.20 และแอลดีไฮด์ให้ร้อยละ 5.17 ในขณะที่น้ำมันหนักมีองค์ประกอบที่เป็นแอลดีไฮด์ให้ร้อยละ 7.43 กลุ่มคีโตนให้ร้อยละ 12.82 ฟีนอลให้ร้อยละ 48.21 กรดคาร์บอกซิลิกให้ร้อยละ 6.5 แอลกอฮอล์ให้ร้อยละ 6.99 กลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนให้ร้อยละ 5.38 กลุ่มอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอนให้ร้อยละ 0.78 และเบนซีนให้ร้อยละ 11.88



ภาพประกอบ 30 โครมาโตแกรมน้ำมันเบาจากเศษไม้กระถินณรงค์

ตาราง 20 องค์ประกอบของน้ำมันเบา

R.T (min)	peak area (%)	สารประกอบ
3.204	6.30	2(5H)-Furanone, 2H-Pyran, 3,4-dihydro- 2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3..., 1,2-
4.097	8.11	Cyclopentanedione, 3-methyl-
4.604	5.36	Phenol, 2-methoxy-
5.363	12.12	Catechol
5.900	10.60	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-
6.035	7.00	1,2-Benzenediol, 4-methy-
6.511	14.14	Phenol, 2,6-dimethoxy-
7.396	31.20	D-Allose, 3,4-Altrosan, .beta.-D-Glucopyranose, 1,6-anhy...
8.458	5.17	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dime..., Dibenzofuran, 4-methyl-



ภาพประกอบ 31 โครมาโตแกรมน้ำมันหนักจากเศษไม้กระถินณรงค์

ตาราง 21 องค์ประกอบของน้ำมันหนัก

R.T (min)	peak area (%)	สารประกอบ
3.590	0.97	Benzaldehyde
3.677	1.54	Phenol, Phosphonic acid, (p-hydroxyphenyl)-
3.854	1.15	Mesitylene, Benzene, 1,2,3-trimethyl-, Benzene, 1,2,4-trimethyl-
4.093	2.41	Mesitylene, Benzene, 1,2,3-trimethyl-, Benzene, 1,2,4-trimethyl-
4.279	1.88	Phenol, 2-methyl-
4.305	0.83	Benzene, 1-methyl-3-propyl-
4.357	1.26	Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-, o-Cymene
4.431	2.09	Phenol, 3-methyl-, p-Cresol
4.513	0.82	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-
4.526	0.67	o-Cymene, Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-
4.578	1.19	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-, o-Cymene
4.600	3.56	Phenol, 2-methoxy-
4.825	1.05	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-, Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-
4.860	1.06	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-, Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-
5.016	1.38	Phenol, 2,5-dimethyl-, Phenol, 2,4-dimethyl-, Phenol, 2,3-dimethyl-
5.289	0.53	Phenol, 2-methoxy-3-methyl-, 2-Methoxy-6-methylphenol, 2-Methoxy-5-methylphenol
5.354	2.11	Catechol
5.389	2.54	Creosol, 2-Methoxy-5-methylphenol
5.831	1.24	1,2-Benzenediol, 3-methyl-, 1,2-Benzenediol, 4-methyl-
5.896	2.21	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-
6.022	3.16	1,2-Benzenediol, 4-methyl-, Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-
6.269	2.15	2-Methoxy-4-vinylphenol, 3-Methyl-4-isopropylphenol, p-Cymen-7-ol
6.403	1.01	Phenol, 2-methoxy-3-methyl-, 1,3-Benzenediol, 4-ethyl-, 3-Acetyl-2,5-dimethyl furan

ตาราง 21 (ต่อ)

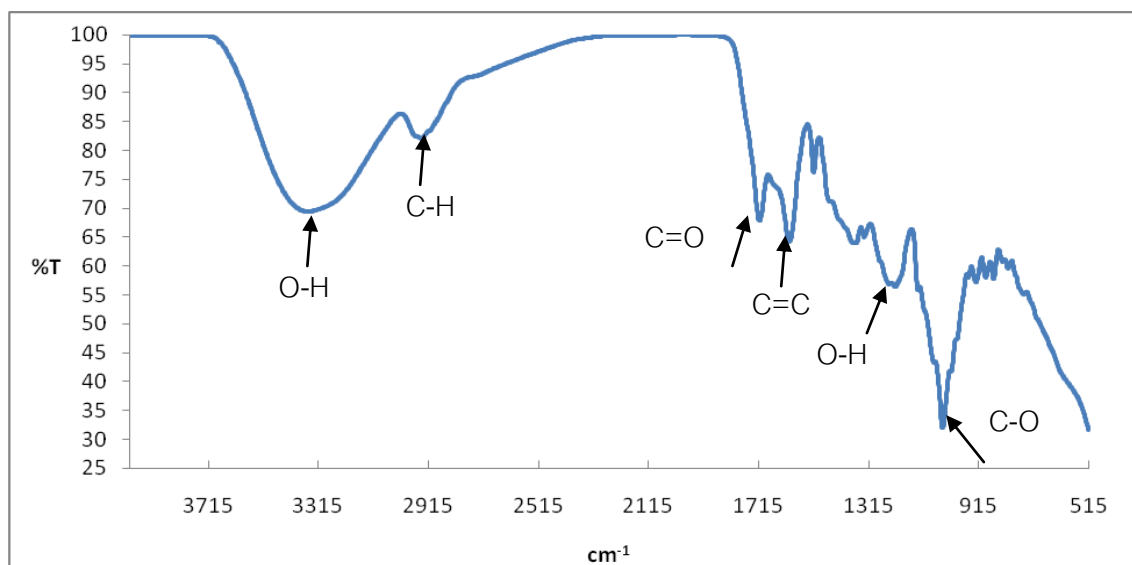
R.T (min)	peak area (%)	สารประกอบ
6.512	9.52	Phenol, 2,6-dimethoxy-
6.564	1.39	Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)-, Eugenol
6.590	1.74	Phenol, 3,4-dimethoxy-
6.681	1.32	4-Ethylcatechol, 1,3-Benzenediol, 4-ethyl-
6.859	2.24	Vanillin
		trans-Isoeugenol, Phenol, 2-methoxy-4-
6.906	1.00	(1-propenyl)-
		Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-, 3-Hydroxy-4-
7.140	4.87	methoxybenzoic acid
		trans-Isoeugenol, Phenol, 2-methoxy-4-
7.179	4.58	(1-propenyl)...
		D-Allose, .beta.-D-Glucopyranose, 1,6-
7.318	1.63	anhy..., Pentanoic acid
7.422	1.91	Apocynin, Ethanone, 1-(3-hydroxy-4-methoxy...
		Hydroquinone mono-trimethylsilyl..., 5-tert-
7.643	3.37	Butylpyrogallol, Ethanone, 1-(2,6-dihydroxy-4-met...
		2,5-Dihydroxy-4-isopropyl-2,4,6-...,
		(+)-2-Phenethanamine, 1-methyl-...,
7.695	1.10	1-(4-methylthiophenyl)-2-propanone
		2,3,5,6-Tetrafluoroanisole, 2,4(1H,3H)-
		Pyrimidinedione, 5-(t..., 2,4,7(1H,3H,8H)-
7.882	3.61	Pteridinetriene
		Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope..., N-(4-
8.107	2.78	Methoxyphenyl)-2-hydroxyimi...
		Benzene, 1,1'-propylidenebis-,
		Benzaldehyde, 4-[[4-(acetyloxy)-..., Benzene, 1,1'-
8.146	1.05	[(2-phenylethoxy)m...
		Phenylamine, N,4,5-trimethyl-2-n..., 2H-1-
		Benzopyran-3,4-diol, 2-(3,4..., Thiazolidin-4-one, 5-
8.298	0.92	(4-hydroxy-...
		Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope..., 2-
8.393	2.62	Hydroxy-4-isopropyl-7-methoxyt...

ตาราง 21 (ต่อ)

R.T (min)	peak area (%)	สารประกอบ
8.454	3.68	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dime..., 4-Acetoxy-3,5-dimethoxybenzaldehyde
8.675	5.38	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope..., 2-Hydroxy-4-isopropyl-7-methoxyt...
8.870	3.39	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimet...
9.065	2.88	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylace..., 2-Pentanone, 1-(2,4,6-trihydroxy..., 1-Butanone, 1-(2,4,6-trihydroxy-...
9.360	0.49	3-Methyl-2-azafluorene, (1,1'-Biphenyl)-2,2'-dicarboxald..., 3,4,5-trimethoxyphenyl-2-propanone
10.162	1.44	3,5-Dimethoxy-4-hydroxycinnamald..., Benzene, 1,2,4-trimethoxy-5-(1-p..., 1,2-Dimethoxy-4-(3-methoxy-1-pro...
11.060	0.29	Acetamide, 2-(adamantan-1-yl)-N-..., Benzamide, N-[2-(cyclopropylmeth..., Benzamide, N-[2-(cyclopropylmeth...

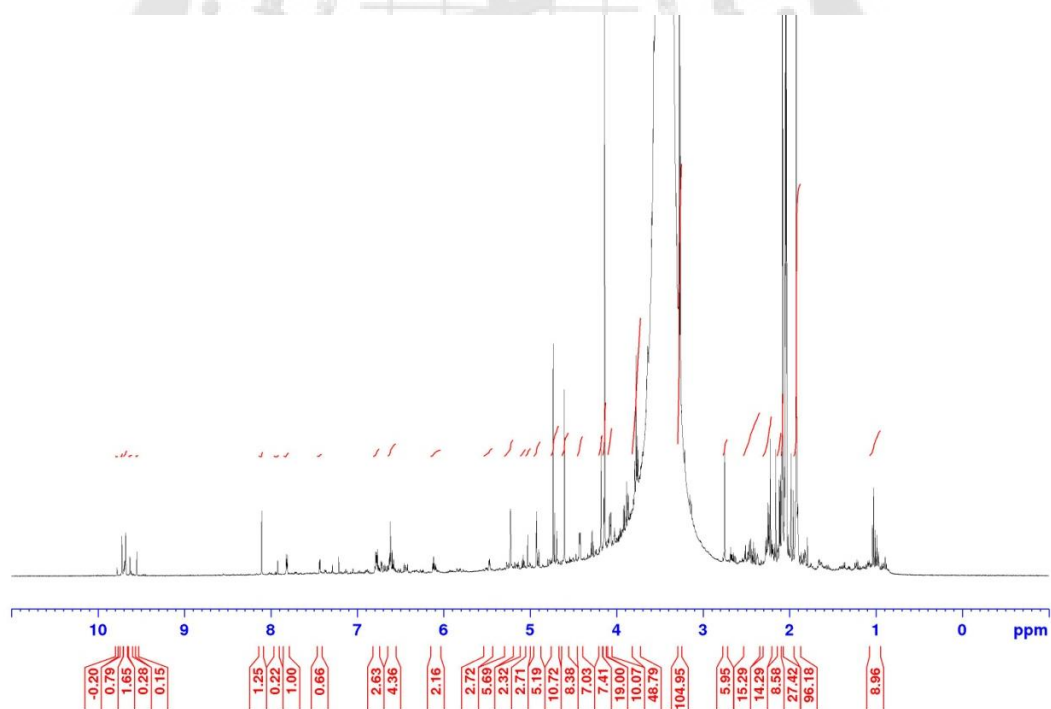
4.7.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเศษไม้กระถินณรงค์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบว่าหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพประกอบด้วย พันธะระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน มีสารประกอบจำพวกแอลกอฮอล์ ฟีนอล และกรดคาร์บอกซิลิก พันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน มีสารประกอบจำพวกอัลเคน พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน มีสารประกอบจำพวกคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ และเอไมด์ พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน มีสารประกอบจำพวกอัลคีน และอะโรมาติก และพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน มีสารประกอบจำพวกอีเทอร์ กรดคาร์บอกซิลิก และแอลกอฮอล์ แสดงภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

4.7.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (H^1 -NMR)



ภาพประกอบ 33 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากเศษไม้กระถินณรงค์ด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์
แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (H^1 -NMR)

ตาราง 22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (H^1 -NMR)

Type of hydrogen	Chemical shift (ppm)	Bio-oil (% of total hydrogen)
Aromatic	6.649-6.820	3.62
Aliphatic adjacent to oxygen	3.824-4.761	57.74
Aliphatic adjacent to aromatic/alkene group	2.097-2.535	34.00
Other Aliphatic	1.075	4.64

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน -นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (H^1 -NMR) พบว่าหมู่อะโรมาติกที่ตำแหน่ง 6.649-6.820 ให้ร้อยละ 3.62 ของไฮโดรเจน หมู่อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับออกซิเจนที่ตำแหน่ง 3.824-4.761 ให้ร้อยละ 57.74 ของไฮโดรเจน หมู่อะลิฟาติกที่ทำพันธะกับอะโรมาติกและแอลคีนสูงที่สุดที่ตำแหน่ง 2.097-2.535 ให้ร้อยละ 34.00 ของไฮโดรเจน และหมู่อะลิฟาติกตัวอื่นๆที่ตำแหน่ง 1.075 ให้ร้อยละ 4.64 ของไฮโดรเจน

ตาราง 23 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ			
		เศษไม้กระถินณรงค์	ยูคาลิปตัส
ทางกายภาพ			
	C	14.31 %	11.27 %
	H	9.68 %	9.83 %
	N	0.17 %	0.01 %
	O	75.84 %	78.89 %
	ค่าความเป็นกรด	105.72 mg-KOH/g.	20.91 mg-KOH/g
ทางเคมี			
GC-MS	Ketone	14.41 %	2.42 %
	Phenol	49.22 %	53.53 %
	Sugar	31.20 %	
	Aldehyde	5.17 %	1.02 %
	other		43.03 %
H^1 -NMR	Aromatic	3.62 %	19.03 %
	Aliphatic adjacent to oxygen	57.74 %	28.83 %
	Aliphatic adjacent to aromatic/alkene group	34.00 %	40.02 %
	Other Aliphatic	4.64 %	12.12 %

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากปัญหาในปัจจุบันที่มีแนวโน้มพัฒนาทั้งภาคการผลิต อุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่ง จึงมีความต้องการการใช้พลังงานมากขึ้น ก่อให้เกิดการขาดแคลนแหล่งพลังงาน ในขณะที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ให้อุตสาหกรรมหรือชีวมวลเป็นจำนวนมาก พบว่าชีวมวลสามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบการไพโรไลซิสแบบเร็วจากเศษไม้กระถินณรงค์แปรรูปเป็นน้ำมันชีวภาพ เพื่อวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมโดยการออกแบบการทดลอง แบบบ็อกซ์-เบนเคน โดยมีปัจจัยในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสาร พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการป้อนสาร เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสเกิดได้ดี ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกสลายสายโซ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ขนาดกลางที่มีขนาดเล็กลง ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมากขึ้น และผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ลดลง นอกจากนี้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนตัวพา มีผลต่อการแตกตัวของเศษไม้กระถินณรงค์ไปเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สตัวพา จะทำให้เวลาทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์ไปยังเศษไม้กระถินณรงค์ โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนได้ดี จึงพบว่าเมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนตัวพาสูงขึ้น จึงทำให้น้ำมันชีวภาพลดน้อยลง แก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่สามารถควบแน่น ได้ถูกนำออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เช่นเดียวกับอัตราการป้อนเศษไม้กระถินณรงค์ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสาร ทำให้เศษไม้กระถินณรงค์มีเวลาสัมผัสในเครื่องปฏิกรณ์น้อย เกิดการแตกตัวลดลง จึงทำให้น้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มที่ลดลง และมีถ่านชาร์สูงขึ้นเล็กน้อย ตัวเร่งปฏิกิริยา แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบสออกไซด์ ที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำให้ค่าความเป็นกรดลดลง ซึ่งให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงกว่าผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์และแก๊ส จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ ผลได้ร้อยละของ ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด พบว่าที่อุณหภูมิ 447.39 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 158.64 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.14 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 132.47 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดที่ร้อยละ 45.16 %โดยน้ำหนัก และจากการทดลองในสภาวะการทดลองจริงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตัวพา 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %โดยน้ำหนัก และอัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดที่ร้อยละ 46.32 %โดยน้ำหนัก และศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกฟีนอล คีโตน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ และมี ค่าความเป็นกรด 105.72 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การไฟฟระไลชิสแบบตอเนืองมีช่วงหนึ่งของอุณหภูมิตัวเก็บสารอยูที่อุณหภูมิห้อง ทำให้น้ำมันหนักที่มีจุดเดือดสูง เกิดการกลั่นตัวได้เร็ว จึงทำให้น้ำมันหนักเกิดการติดออกมากับถ่านชาร์ และสามารถแก้ไขโดยการนำถ่านชาร์ไปฉีดด้วยสารอะซีโตน เพื่อสกัดแยกน้ำมันหนักออกมา
2. น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความเป็นกรดสูง ต้องนำน้ำมันชีวภาพที่ได้มาทำการปรับสภาพให้มีค่าความเป็นกรดลดน้อยลง ก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป
3. ควรมีการเก็บแก๊สจากการทดลอง เพื่อนำมาศึกษาองค์ประกอบที่อยู่ในแก๊ส



บรรณานุกรม

- เทคนิคคอล เอ็นเนอร์จี คอนซัลแตนท์. (2554). รายงานสรุปสำหรับผู้บริหารโครงการศึกษากำหนดแนวทางส่งเสริมการใช้ชีวมวลแบบผลิตพลังงานความร้อนตามแผนพัฒนาพลังงาน 15 ปี. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน.
- ทงศักดิ์ วัฒนา. (2553). พลังงานจากแก๊สชีวมวลและไบโอออยล์ในเครื่องยนต์ต้นกำลัง. *Energy and Environment*. 37(213): 63-68.
- มนูญ ศิริวรรณ. (2555). ข้อเท็จจริงสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย. (เอกสารประกอบการบรรยายการสัมมนาพลังงานทดแทน ทางรอด ทางเลือกประเทศไทย). กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันต์; และคนอื่นๆ. (2553). ศักยภาพของกระถินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา และกระถินเทพณรงค์ในการปลูกเป็นสวนป่าพืชพลังงาน. ใน เอกสารการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48: สาขาพืช. หน้า 579-586. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิมล สุตสุข; และ ศิริภัตสร เกียรติพิ้งพร. (2553). การไฟโรไลซิสของใยผลปาล์ม เปลือกเมล็ดกาแฟ และไม้ยูคาลิปตัส. ครงงานวิทยานิพนธ์. วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วารินทร์ หาญอุดมลาภยศ. (2555). ดัชนีชี้แจงแรงปฏิบัติการของน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรณช แจงสว่าง. (2551). พลังงานหมุนเวียน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริรัตน์ จิตการคำ. (2551). จากขยะสู่น้ำมัน: เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). สถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2556. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- สุพจน์ แหวนเพ็ชร. (2552). การผลิตไบโอออยล์จากผักตบชวาโดยการไฟโรไลซิสแบบเร็ว. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เคมีเทคนิค). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุนทร สุทธิบาก. (2555). การผลิตไบโอออยล์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดและหน่วยกรองไอร้อน. วิทยานิพนธ์ ปร.ด. (วิศวกรรมเครื่องกล). มหาสารคาม: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- สุวดี จางอัสระกุล; และคนอื่นๆ. (2552). ชีวมวลทางเลือกใหม่สำหรับพลังงานทดแทนโดยเปลือกถั่วเหลืองและหญ้าแฝก ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สำนักคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2543). เชื้อเพลิงแห่งอนาคต. วารสารนโยบายแห่งชาติ. 8(7): สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2557, จาก <http://www.eppo.go.th/vrs/VR50-03-FutureFuel.html>
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). การใช้ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.

- หิรัญ ชันทองคำ; เรืองวุฒิ แจ่มวุฒิปรีชา; และสุภพงค์ แสงสันต์. (2547). *ศักยภาพพลังงานชีวมวล*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- เอทีที คอลซัลแตนท์; ที ไอ เอส คอลซัลแตนท์; และเอเบิล คอลซัลแตนท์. (2548). *รายงานฉบับสมบูรณ์ การศึกษาและประเมินศักยภาพแหล่งชีวมวล*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน.
- Ana A. Rengel I. (2007). *Study of Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: State of the Art and Modelling*. Thesis, M.S. (Industrial Ecology). Stockholm: Royal Institute of Technology.
- A. Veses; et al. (2014). Catalytic pyrolysis of wood biomass in an auger reactor using calcium-based catalysts. *Bioresource Technology*. (162): 250-258.
- C.E. Greenhalf; et al. (2013). A comparative study of straw, perennial grasses and hardwoods in terms of fast pyrolysis products. *Fuel*. (108): 216-230.
- Carlos Amen-Chen; Hooshang Pakdel; and Christian Roy. (1997). Separation of phenols from Eucalyptus wood tar. *Biomass and Bioenergy*. 13: 25-37.
- Energy for Environment Foundation. (2008). *Biomass*. Bangkok: Energy for Environment Foundation.
- Erakhrumen Andrew Agbontalor. (2007). Overview of Various Biomass Energy Conversion Routes. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*. 2(6): 662-671.
- Huiyan Zhang; et al. (2011). Biomass fast pyrolysis in a fluidized bed reactor under N₂ CO₂, CO, CH₄ and H₂ atmospheres. *Bioresource Technology*. (102): 4258-4264.
- Jim Clark. (2002). *Types of catalysis*. Retrieved July 17, 2014, from <http://www.chemguide.co.uk/physical/catalysis/introduction.html>
- Jan-Ems Joubert. (2013). *Pyrolysis of Eucalyptus grandis*. Dissertation. M.S. (Chemical Engineering). Western Cape: Stellenbosch University.
- James L. Easterly, P.E. (2002). *Assessment of Bio-oil as a Replacement for Heating Oil*. CONEG Policy Research Center, Inc.
- Melisa Bertero; et al. (2014). Characterization of the liquid products in the pyrolysis of residual chanar and palm fruit biomasses. *Fuel*. (116): 409-414.
- Mohammad I. Jahirul; et al. (2012). Biofuel production through biomass pyrolysis – A technological review. *Energies*. 5: 4952-5001.
- Mohan D; et.al. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*. (20): 848-889.
- Pavin Kumar. (2011). *Numerical Investigation of cold flow hydrodynamics of auger reactor*. Thesis, M.S. (Process Design Engineering), Dehradun: University of Petroleum and Energy Studies.

- Pushkaraj R. Patwardhan; et al. (2010). Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose. In *Understanding the product distribution from biomass fast. pyrolysis*. pp. 48-49. Ames: Iowa State University.
- Paul T. Williams; and Serpil Besler. (1996) The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy*. (7): 233-250.
- Robert C; Brown; and Jennifer Holmgren. (2006). *Fast pyrolysis and Bio-oil upgrading*. [online]. Retrieved July 17, 2014, from <http://www.pdfdrive.net/fast-pyrolysis-and-bio-oil-upgrading-e2964570.html>
- S.I. Yang; M.S. Wu; and C.Y. Wu. (2014). Application of biomass fast pyrolysis part I: Pyrolysis characteristics and products. *Energy*. (66): 162-171.
- Samy Sadaka. (2008). *Pyrolysis*. Ames: Iowa State University.
- Samy Sadaka. (2009) Pyrolysis and bio-oil. *Agriculture and natural resources*. (1052): 1-6
- S. Czernik; and A.V. Bridgwater. (2004). Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. *Energy and Fuel*. (18): 590-598.
- Tani H, Hasegawa T, Shimouchi M, Asami K, Fujimoto K. (2011). Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon. *Catalysis Today*. (164): 410-414.
- Younes Chhiti; and Mohammed Kemiha. (2013). Thermal Conversion of biomass, pyrolysis and gasification: A review. *The international Journal of Engineering and Science*. 2(3): 75-85.
- Zhang Qi; et al. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management*. (48): 87-92.
- Zhiquan Hu; et al. (2013). Bio-oil production through pyrolysis of blue-green algae blooms (BGAB): Product distribution and bio-oil characterization. *Energy*. (52): 119-125



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติของแข็ง

การวิเคราะห์ของแข็งแบบประมาณ (proximate analysis: ASTM D3172–D3175)

1 ปริมาณความชื้น (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3173)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งบดอนุภาคและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาอบด้วยความร้อนเพื่อลดความชื้นให้อไอน้ำระเหยออกจากของแข็งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของแข็งที่หายไป

อุปกรณ์

1. เตาอบ
2. ครูซิเบิลทำจากทองคำขาว (Platinum crucible) พร้อมฝาปิด
3. ภาชนะดูดความชื้น (desiccator)

วิธีการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่ครูซิเบิล พร้อมฝาปิดในเตาอบ ทั้งให้เย็นในภาชนะดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 15-30 นาที ซึ่งน้ำหนักและบันทึกผลที่ได้
2. นำตัวอย่างของแข็ง 1 กรัม ใส่ในครูซิเบิล และปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง
3. นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในภาชนะดูดความชื้น จนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างของแข็งคงที่
4. ชั่งน้ำหนักครูซิเบิล ที่มีตัวอย่างของแข็งที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

การคำนวณ

ร้อยละของปริมาณความชื้น = $[(A-B)/A] \times 100$

เมื่อ	A	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)
	B	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็งหลังจากที่ให้ความร้อน (กรัม)

2 ปริมาณสารระเหยง่ายในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3175)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งบดอนุภาคและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่หายไป

อุปกรณ์

1. เตาอบแบบท่อ
2. ครูซิเบิลทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. ภาชนะดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่ครุชีเบล พร้อมฝาปิดในเตาอบ ทั้งให้เย็นในภาชนะดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 15-30 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผลที่ได้
2. นำตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในครุชีเบลพร้อมฝาปิด ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
3. นำเข้าเตาอบให้ความร้อนแก่ตัวอย่างของแข็งที่ด้านบนของเตาอบนาน 2-3 นาที และที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 7 นาทีจนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่
4. นำครุชีเบลออกจากเตาอบ ทั้งให้เย็นในภาชนะดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างของแข็งที่เหลืออยู่ พร้อมทั้งบันทึกผลข้อมูลที่ได้

การคำนวณ

1. คำนวณร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่างของแข็ง

$$\text{ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย} = [(A-B)/A] \times 100$$
 เมื่อ A น้ำหนักของตัวอย่างของแข็งเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)
 B น้ำหนักของตัวอย่างของแข็งหลังจากที่ให้ความร้อน (กรัม)
2. คำนวณร้อยละของสารระเหย

$$\text{ร้อยละของสารระเหย} = C-D$$
 เมื่อ C ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย
 D ร้อยละของปริมาณความชื้น

3 ปริมาณซีเถ้าในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D3174)

หลักการ

ทำการการเผาไหม้ตัวอย่างของแข็งที่ร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร จนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณซีเถ้าจะได้จากส่วนที่เหลือหลังจากการเผาไหม้โดยการนำมาชั่งน้ำหนัก

อุปกรณ์

1. เตาเผาตัวอย่าง
2. ครุชีเบลพร้อมฝา
3. เครื่องชั่งแบบสมดุล
4. ภาชนะดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่ครุชีเบล พร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ทั้งให้เย็นในภาชนะดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 15-30 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผลที่ได้
2. นำตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในครุชีเบลที่ทราบน้ำหนักแน่นอนพร้อม ปิดฝาทันทีหรือเลือกใช้ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วก็ได้ ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
3. นำตัวอย่างของแข็งมาดำเนินการด้วยการให้ความร้อนที่มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้ อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง
4. นำครุชีเบลออกจากเตาเผา ทั้งให้เย็น และชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

		ร้อยละของปริมาณซีเมนต์ = $[(A-B)/C] \times 100$
เมื่อ	A	น้ำหนักของครุซีเมนต์พร้อมฝาและส่วนที่เหลือของซีเมนต์ (กรัม)
	B	น้ำหนักของครุซีเมนต์พร้อมฝา (กรัม)
	C	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างของแข็ง (Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke: ASTM D3172)

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละสารระเหยง่าย})$$



ภาคผนวก ข
การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิง



ภาคผนวก ข

การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิง

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

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

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

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

3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

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

โดย	W_{Daf}	=	น้ำหนักเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น
	W_{R}	=	น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น
	W_{Liq}	=	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว



ภาคผนวก ค
การหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก ค

การหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครมาโทกราฟี ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีความสามารถแยกและวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบที่หลากหลายได้ และยังให้ผลแม่นยำและรวดเร็ว แก๊สโครมาโทกราฟี มีเทคนิคในการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็ง เรียกว่า “gas-solid chromatography” (GSC) และการใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียกว่า “gas-liquid chromatography” (GLC) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีเฟสเคลื่อนที่ได้เป็นแก๊ส เทคนิคทั้งสองได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่เทคนิคของ GLC เป็นที่นิยมกันมากกว่า แก๊สโครมาโทกราฟี ใช้ได้กับสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์เท่านั้น ดังนั้นวิธีการของ แก๊สโครมาโทกราฟีจึงเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น เพราะ สารประกอบอินทรีย์สามารถกลายเป็นไอได้ง่าย จะไม่ใช้วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสำหรับการ วิเคราะห์สารประกอบอนินทรีย์ เพราะสารประกอบอนินทรีย์ไม่สามารถกลายเป็นไอได้ใน อุณหภูมิปกติ (ที่ทำการทดลอง) ของคอลัมน์ วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งทางคุณภาพและทางปริมาณ

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้ร่วมกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อ จะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)
 - 1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID
2. Gas Traps และ Filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและ บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Cartridge คือ
 - 2.1 Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น
 - 2.2 Oxygen Trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน
 - 2.3 Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับ แก๊ส
 ตัวพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter
3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา
4. ส่วนที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ
5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจาก ทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้ สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มม. อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้
 - 5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลว เคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ยึดผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร

5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร

5.3 Micropacked Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร

6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมี ขั้ว ไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด





ภาคผนวก ง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลนิยมใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการศึกษาผลรวมที่มีต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แต่ละระดับเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรือเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักร หรือ คนงาน เป็นต้น และในสองระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นก็ได้ ใน 1 เพลกิตที่บริบูรณ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับมีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องทำการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิดการทดลองลดจำนวนลงเพื่อที่สามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล ประกอบด้วย 2 ระดับ ผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อใช้ปัจจัยทำการศึกษาระบบ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับเป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับชนิดแรก คือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “สูง” และ “ต่ำ” การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย สำหรับการออกแบบจะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้น สำหรับการออกแบบ 2^k ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สูตรการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) $\times$ [สัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร]
2. Effect Estimate = $2 \frac{(\text{Contrast}_{AB...K})}{n 2^k}$
3. Sum of Squares_{AB...K} (SS)

$$SS_{AB...K} = (\text{Contrast}_{AB...K})^2$$
4. Total of sum of squares (SS_T)

$$SS_T = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N; N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$
5. Sum of Squares Error (SS_E)

$$SS_E = SS_T - SS \text{ main effect}$$
6. Mean of Square (MS)

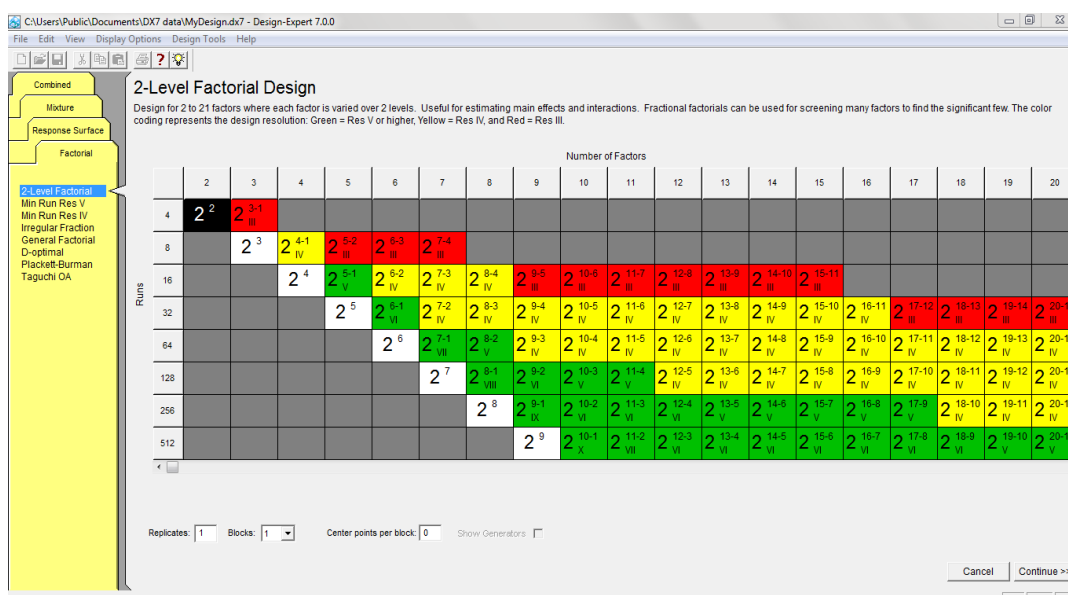
$$MS = SS / \text{Degree of freedom}$$
7. % Normal Probability = $\frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total Cumulative frequency}}$
8. $F_0 = MS \text{ effect} / MS \text{ error}$

การใช้โปรแกรม Design Expert

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Design Expert รุ่น 7.0.1 โดยมีขั้นตอนในการออกแบบการทดลองจนถึงวิธีการคำนวณ ดังต่อไปนี้

1. วิธีการเลือกแบบจำลอง และการกำหนดตัวแปรเพื่อทำการออกแบบการทดลอง

- เข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New Design และจะแสดงดังรูปที่ ง.1 เลือกแบบจำลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในที่นี้ ต้องการศึกษ 4 ตัวแปร ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองแบบ 2^4

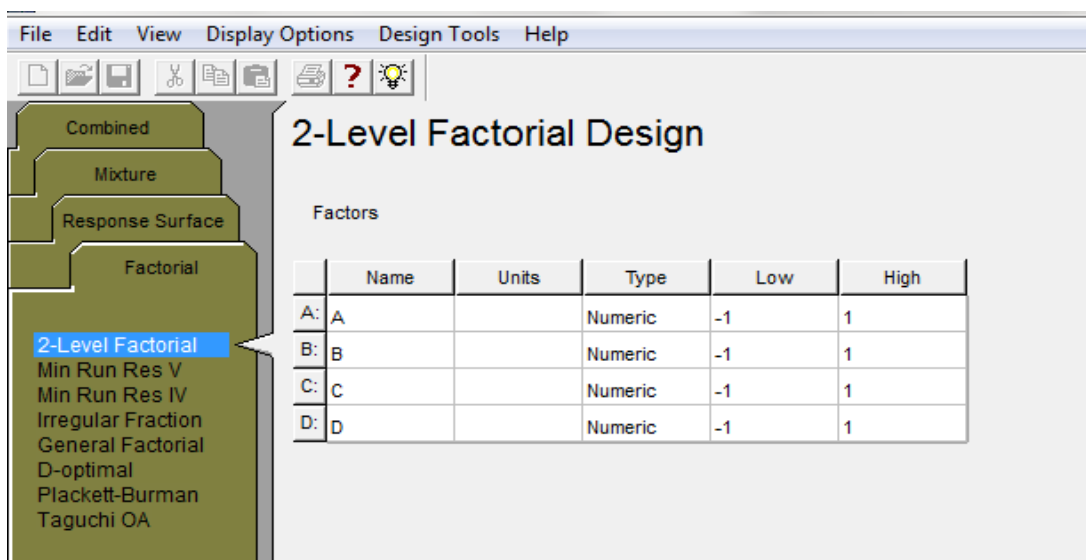


ภาพประกอบ ง.1 แสดงตารางของ 2 Level Factorial Design

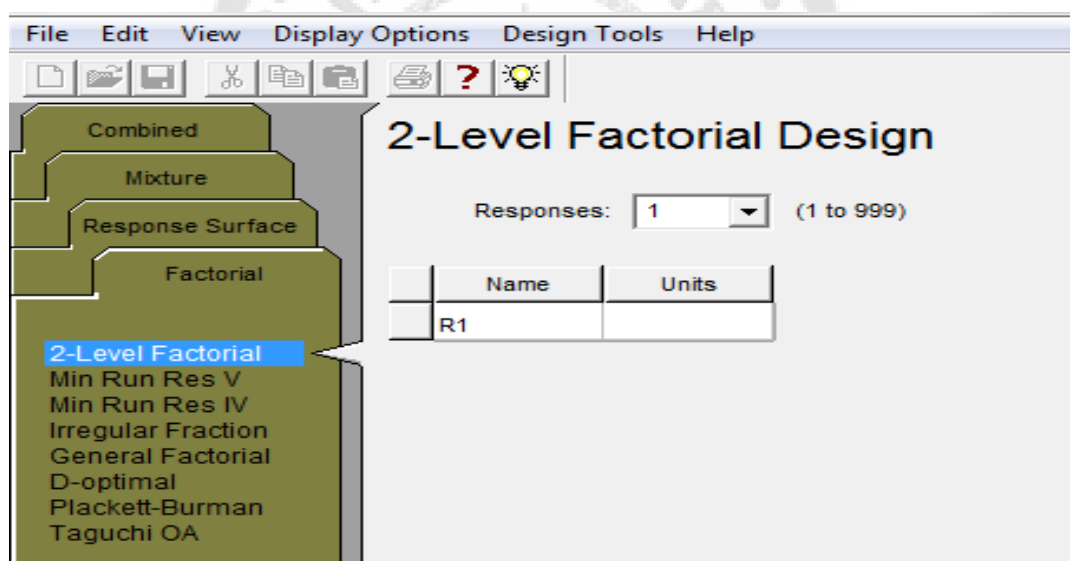
- ทำการเลือก ตามข้อ 1.a แล้วจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ง.2 ให้ใส่ข้อมูลดังต่อไปนี้

ที่ช่อง Name ให้ใส่ชื่อตัวแปร
 ที่ช่อง Units ให้ใส่หน่วยของตัวแปร
 ที่ช่อง Low ให้ใส่ค่าต่ำของตัวแปร
 ที่ช่อง High ให้ใส่ค่าสูงของตัวแปร

จากนั้นกด Continue แสดงหน้าต่างดังรูปที่ ง.3 ทำการเลือกจำนวนตัวแปรตอบสนอง (response) และใส่ชื่อพร้อมทั้งหน่วยของตัวแปรตอบสนอง แล้วกด Continue



ภาพประกอบ ง.2 การกำหนดตัวแปร



ภาพประกอบ ง 3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

- c. เมื่อกำหนดค่าตามข้อ 1.b เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะแสดงตาราง ดังที่แสดงในรูปที่ ง .4 ซึ่งประกอบไปด้วยลำดับการทดลอง ค่าของตัวแปรในแต่ละการทดลองและช่องว่างเพื่อกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลอง เมื่อทำการทดลองครบทุกการทดลองและกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

File Edit View Display Options Design Tools Help

Notes for 2k my lab dx7

Design (Actual)

Summary

Graph Columns

Evaluation

Analysis

Liq. Yield (Analyzed)

Naphtha (Analyzed)

Kerosene (Analyzed)

Diesel Fr. (Analyzed)

Residue (Analyzed)

Optimization

Numerical

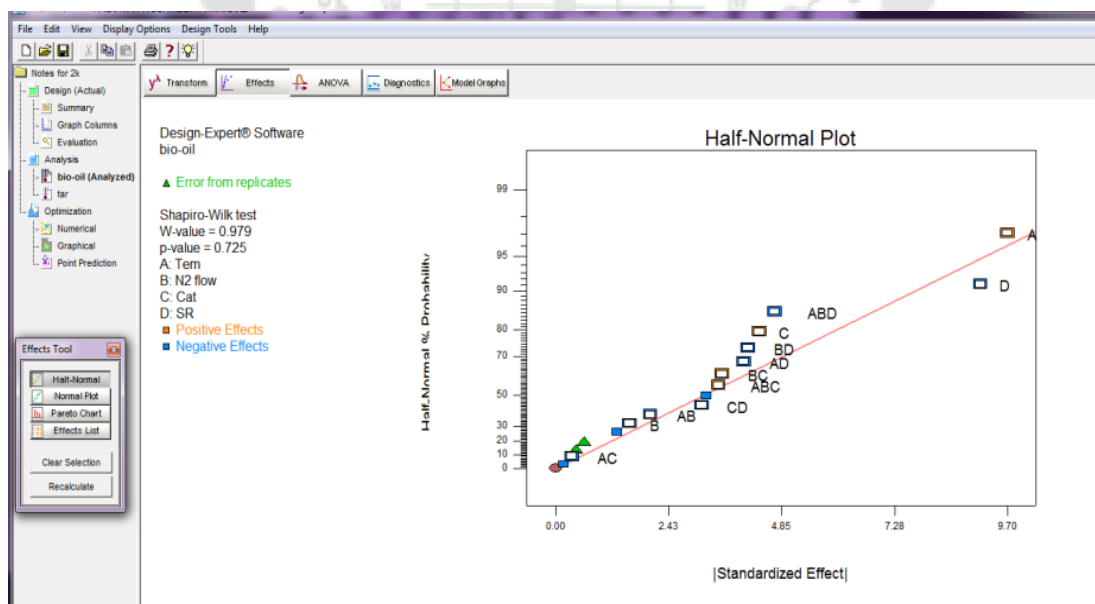
Graphical

Point Prediction

	Std	Run	Block	Factor 1 A: Temperature oC	Factor 2 B: Feed rate ml/min	Factor 3 C: N2 Flow m/min	Factor 4 D: Cat. Vol. %v/v	Response 1 Liq. Yield %	Response 2 Naphtha %	Response 3 Kerosene %	Response 4 Diesel Fr. %	Response 5 Residue %
	16	1	Block 1	450.00	9.00	150.00	60.00	90.7121	10	20.625	54.375	15
	12	2	Block 1	450.00	9.00	50.00	60.00	66.4211	10	13.75	64.375	11.875
	9	3	Block 1	400.00	3.00	50.00	60.00	40	8.75	28.125	61.875	1.25
	13	4	Block 1	400.00	3.00	150.00	60.00	47.8165	8.75	26.25	62.5	2.5
	7	5	Block 1	400.00	9.00	150.00	30.00	46.8175	8.125	23.125	63.125	5.625
	6	6	Block 1	450.00	3.00	150.00	30.00	88.1398	5.625	20.5	58.875	15
	15	7	Block 1	400.00	9.00	150.00	60.00	81.231	7.5	17.5	61.875	13.125
	8	8	Block 1	450.00	9.00	150.00	30.00	82.8555	11.25	22.5	57.5	8.75
	2	9	Block 1	450.00	3.00	50.00	30.00	67.0631	8.75	22.5	57.5	11.25
	5	10	Block 1	400.00	3.00	150.00	30.00	25	5	17.5	66.25	11.25
	14	11	Block 1	450.00	3.00	150.00	60.00	75.4402	8.75	21.25	62.5	7.5
	3	12	Block 1	400.00	9.00	50.00	30.00	89.4666	6.25	16.875	54.375	22.5
	4	13	Block 1	450.00	9.00	50.00	30.00	70.6514	8.75	20.625	56.875	13.75
	1	14	Block 1	400.00	3.00	50.00	30.00	58.9589	9.375	24.375	62.5	3.75
	10	15	Block 1	450.00	3.00	50.00	60.00	72.7483	11.25	27.5	58.125	3.125
	11	16	Block 1	400.00	9.00	50.00	60.00	45.9599	7.5	25	67.5	0

ภาพประกอบ ง 4 จำนวนการทดลองและค่าของตัวแปรแต่ละการทดลอง

- d. การวิเคราะห์ผลการทดลอง เริ่มจากเลือกตัวแปรตอบสนองที่ต้องการวิเคราะห์ที่แถบทางด้านซ้ายมือ และกด Effects ดังรูปที่ ง.5 ทำการเลือกจุดที่มีแนวโน้มออกจากเส้นตรง



ภาพประกอบ ง.5 Half normal plot

- e. กด ANOVA จะแสดงตาราง ดังรูปที่ ๖.6 ซึ่งแสดงตาราง ANOVA ที่วิเคราะห์ได้ ทำการอ่านค่า และวิเคราะห์ผล ทำตามขั้นตอน 1.d และ 1.e ให้ครบทุกตัวแปรตอบสนอง

ANOVA for selected factorial model

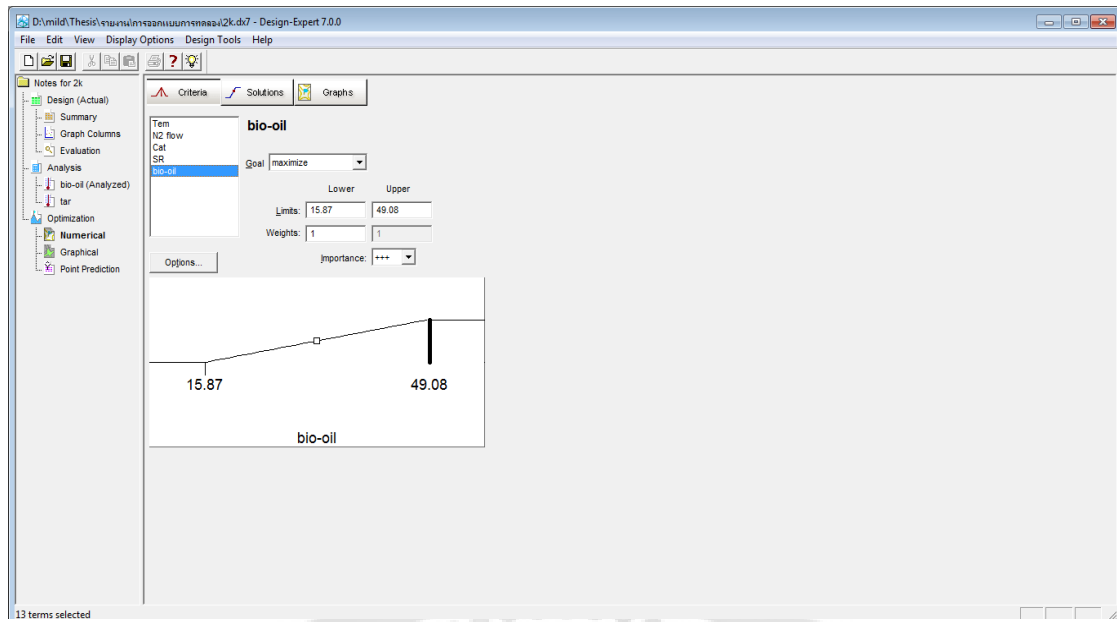
Analysis of variance table (Partial sum of squares - Type III)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Prob > F
Model	1173.97	12	97.83	5.31	0.0306	significant
A-Tem	376.46	1	376.46	20.42	0.0063	
B-N2 flow	10.06	1	10.06	0.55	0.4932	
C-Cat	76.61	1	76.61	4.16	0.0971	
D-SR	332.97	1	332.97	18.06	0.0081	
AB	16.46	1	16.46	0.89	0.3881	
AC	0.47	1	0.47	0.025	0.8799	
AD	65.17	1	65.17	3.53	0.1189	
BC	51.02	1	51.02	2.77	0.1571	
BD	68.19	1	68.19	3.70	0.1125	
CD	39.34	1	39.34	2.13	0.2039	
ABC	48.83	1	48.83	2.65	0.1646	
ABD	88.41	1	88.41	4.80	0.0801	
Curvature	34.89	1	34.89	1.89	0.2273	not significant
Residual	92.18	5	18.44			
Lack of Fit	48.90	3	16.30	0.75	0.6136	not significant
Pure Error	43.28	2	21.64			
Cor Total	1301.05	18				

The Model F-value of 5.31 implies the model is significant. There is only

ภาพประกอบ ง 6 ANOVA ของการวิเคราะห์ตัวแปร

- f. เมื่อทำการวิเคราะห์ครบทุกตัวแปรตอบสนองแล้ว จะทำการหาภาวะที่เหมาะสม โดยเลือก Numerical ด้านล่างคำว่า Optimization ตรงแถบด้านซ้ายมือ ดังที่แสดงในรูปที่ ๖.7 ทำการกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ เช่น เลือกให้มีค่าสูงสุด (maximum) จากนั้นกด Solution จะแสดงตารางที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ดังรูปที่ ๖.8



ภาพประกอบ ง 7 กำหนดตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม

Design-Expert 7.0.0 - Solutions tab.

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Tem	is in range	360	450	1	1	3
N2 flow	is in range	80	160	1	1	3
Cat	is in range	1	5	1	1	3
SR	is in range	120	360	1	1	3
bio-oil	maximize	15.87	49.08	1	1	3

Solutions						
Number	Tem	N2 flow	Cat	SR	bio-oil	Desirability
1	449.97	160.00	5.00	120.45	46.6683	0.927
2	449.36	160.00	5.00	120.00	46.542	0.924
3	450.00	160.00	4.91	120.72	46.3271	0.917
4	450.00	159.99	4.88	120.00	46.2859	0.916
5	450.00	160.00	4.99	125.96	46.0614	0.909
6	450.00	159.72	4.79	120.04	45.9421	0.906
7	449.99	159.40	4.77	120.00	45.799	0.901
8	447.15	160.00	5.00	122.06	45.7179	0.899
9	450.00	152.12	5.00	120.00	45.5134	0.893
10	450.00	151.78	5.00	120.00	45.4607	0.891
11	450.00	160.00	4.55	120.00	45.1367	0.881
12	443.68	160.00	5.00	120.00	44.9557	0.876
13	449.99	160.00	4.41	120.00	44.6192	0.866

13 terms collected

ภาพประกอบ ง 8 ผลการคำนวณภาวะที่เหมาะสม

ภาคผนวก จ
การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบนเคน

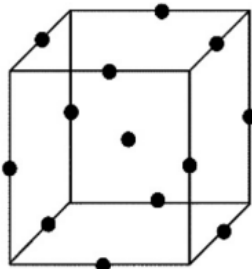


ภาคผนวก จ

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken)

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขกระบวนการทำการทดลองและเงื่อนไขผลได้ที่เหมาะสม ประกอบไปด้วยปัจจัยในการทดลองที่จุดบริเวณกึ่งกลางขอบแต่ละด้าน แสดงดังภาพประกอบ ซึ่งการออกแบบสมการกำลังสองนี้สามารถหมุนได้ “rotatable” โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ คือ ระดับสูง (+) ระดับกลาง (0) และระดับต่ำ (-) และมีจำนวนครั้งการทดลองที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (central composite design: CCD)



การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน จะได้ข้อมูลทั้งสิ้น $N = k^2 + k + c_p$ ซึ่ง k คือ จำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา และ c_p คือ จำนวนที่ทำการทดลองซ้ำของค่ากลาง (central point)

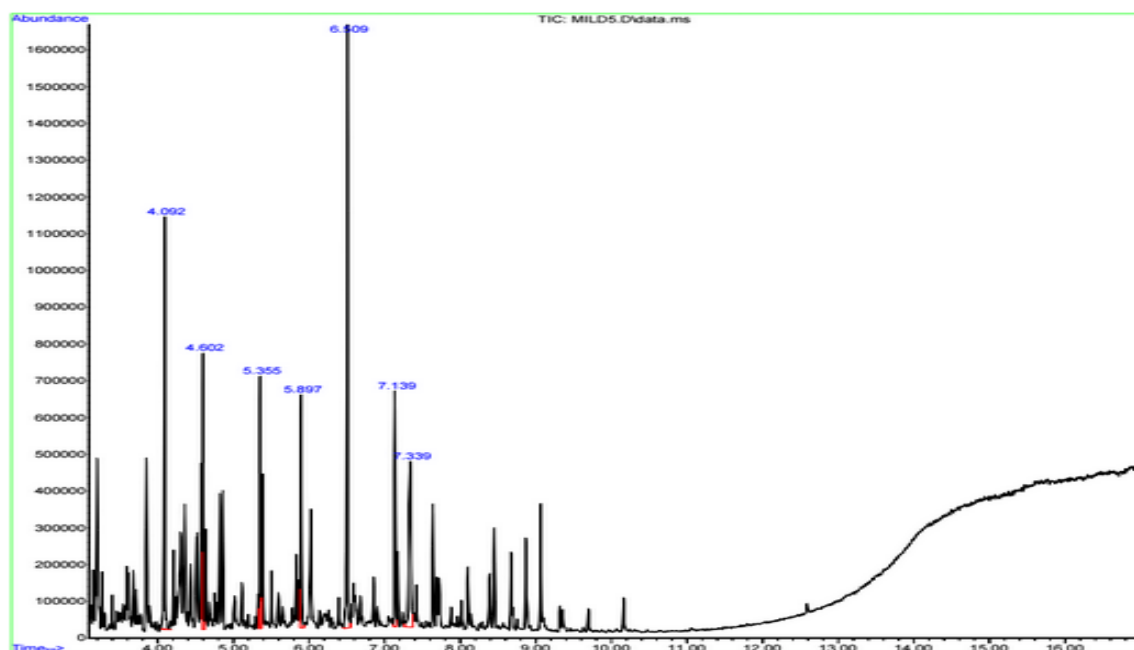


ภาคผนวก ฉ
การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

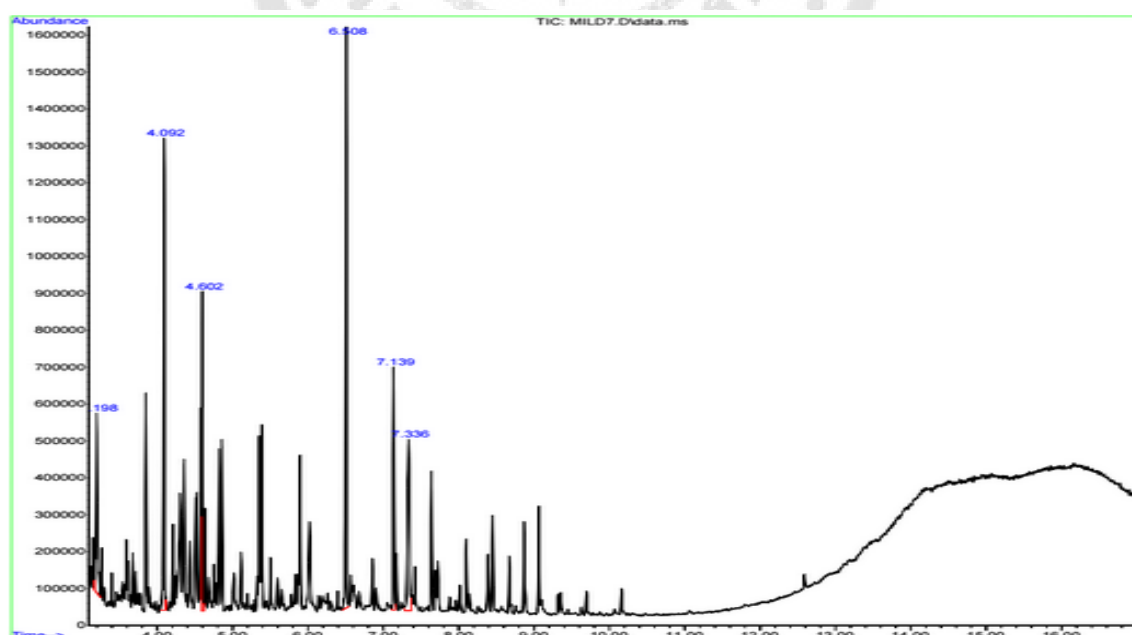
ภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

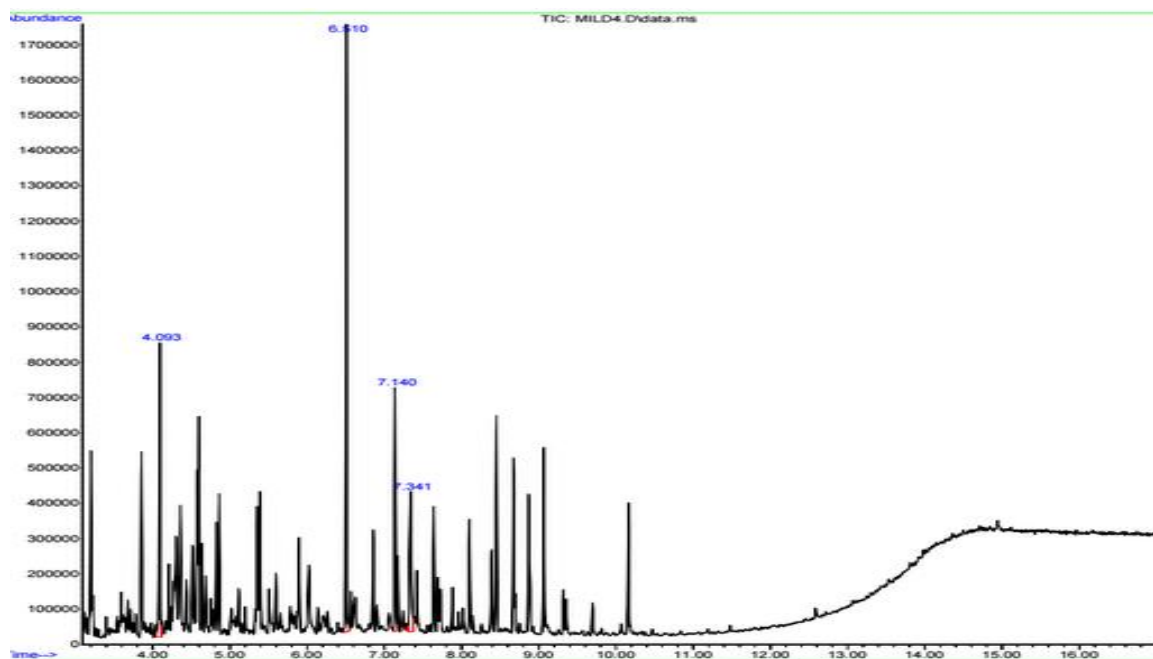
ฉ.1 ภาพการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิค gas chromatography – mass spectrometry (GC-MS)



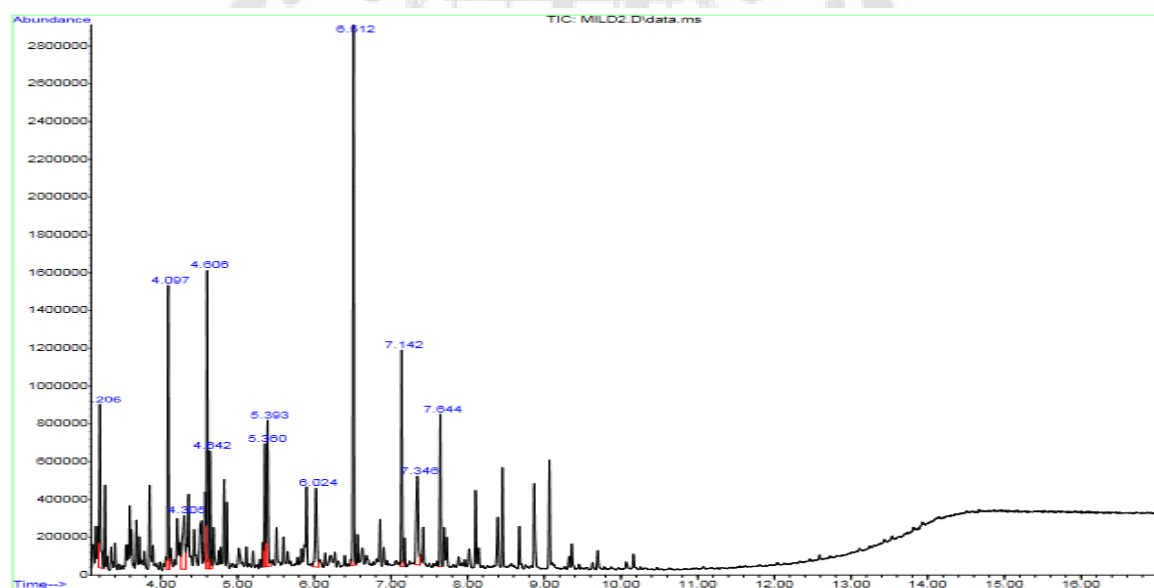
(ก) 450 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 120 รอบต่อนาที



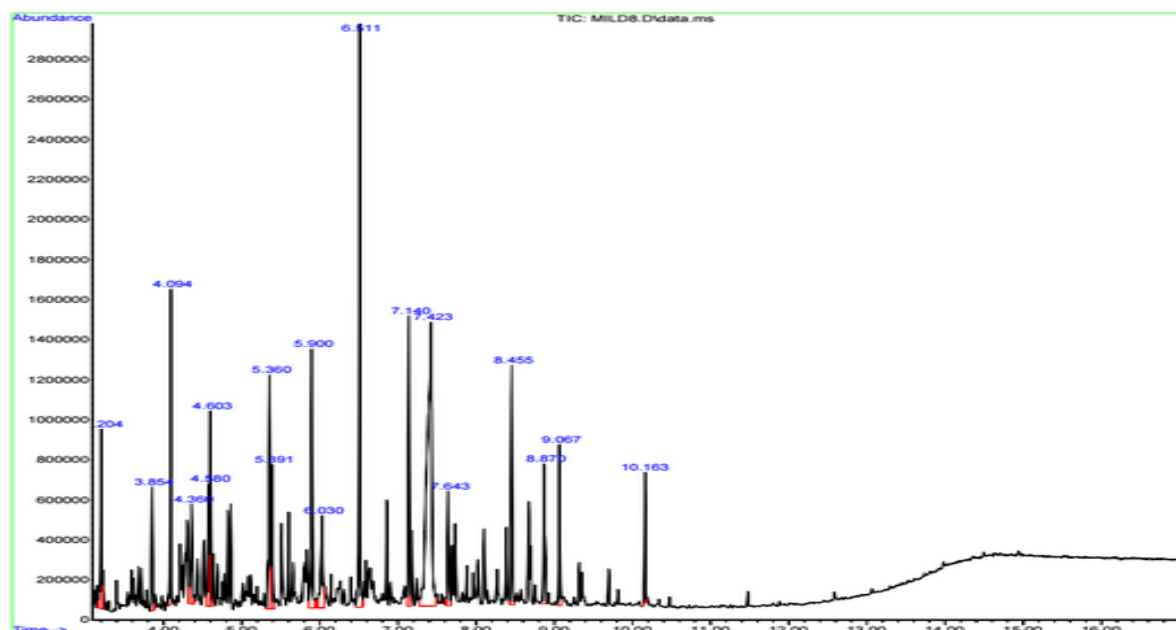
(ข) 450 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 360 รอบต่อนาที



(ค) 380 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 360 รอบต่อนาที

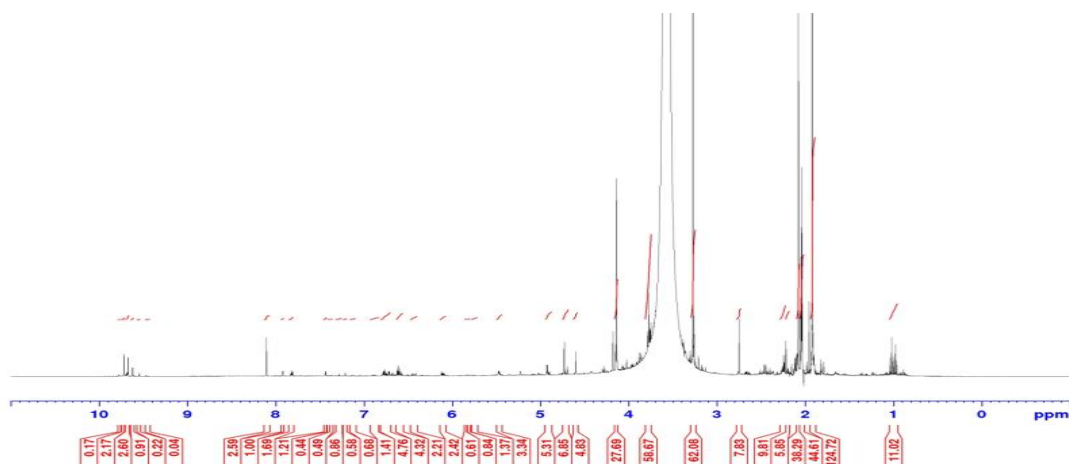


(ง) 380 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 120 รอบต่อนาที

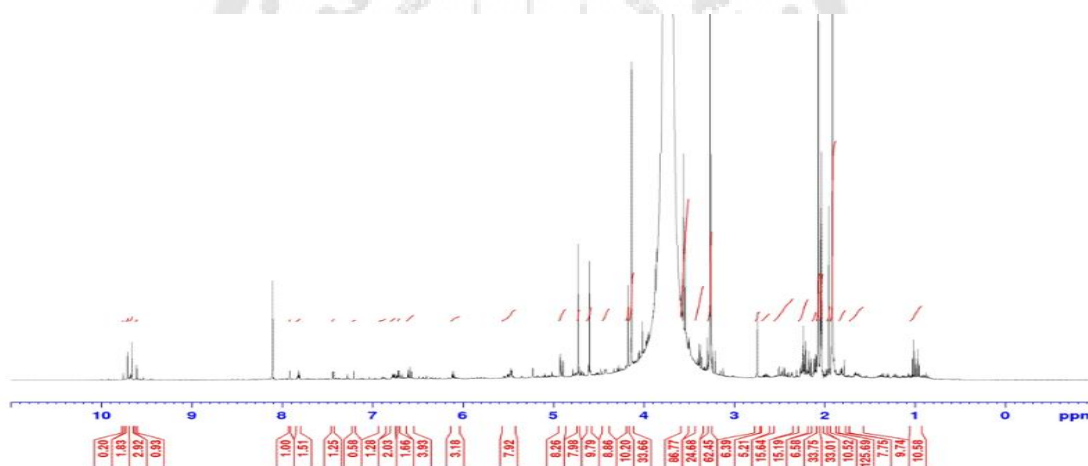


(จ) 450 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 360 รอบต่อนาที

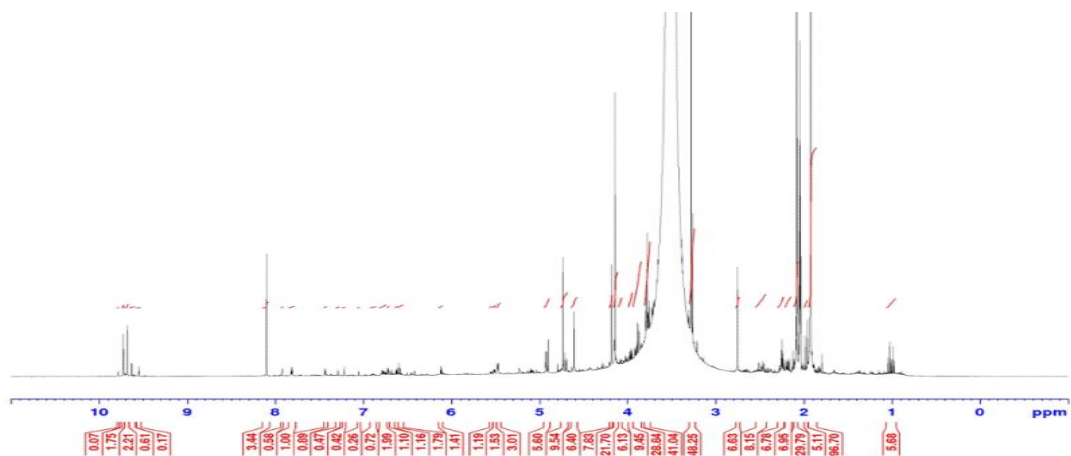
ฉ.2 ภาพการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคโปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (^1H -NMR)



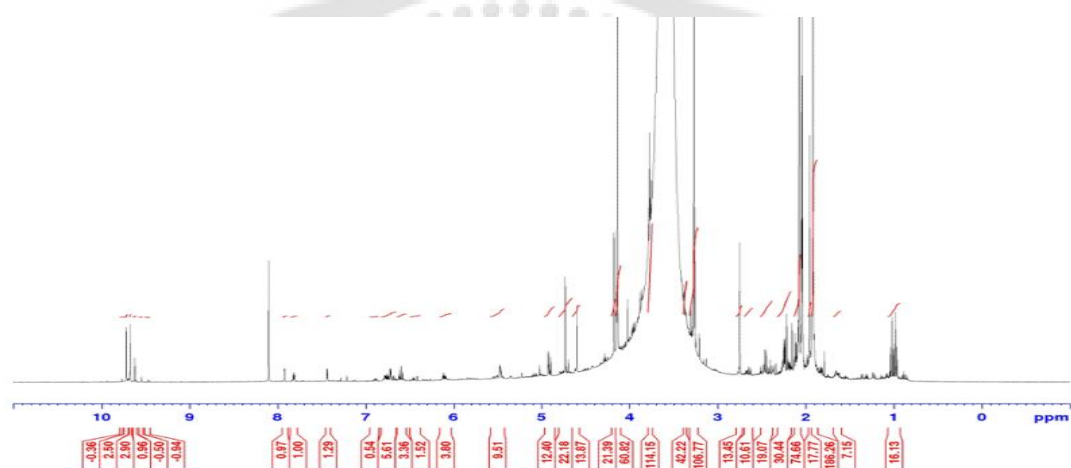
(ก) 450 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 120 รอบต่อนาที



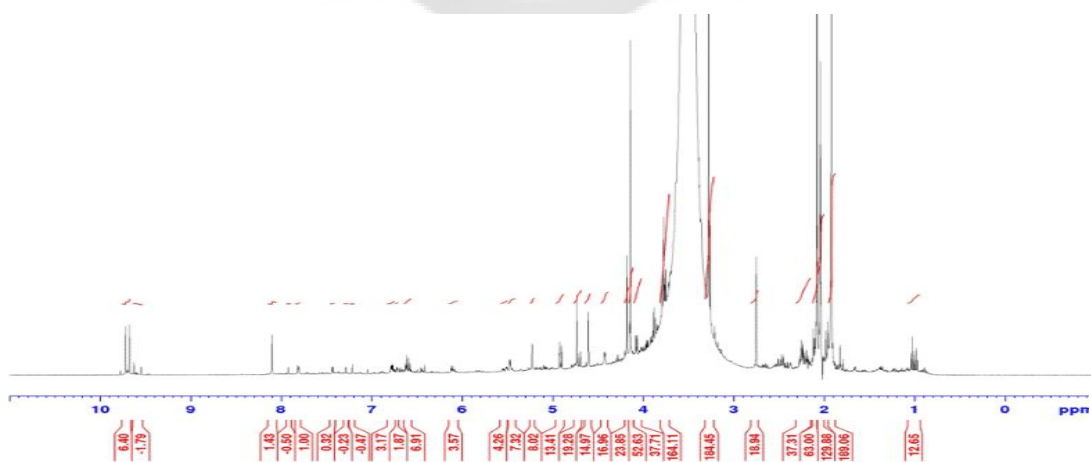
(ข) 450 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 360 รอบต่อนาที



(ค) 380 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 360 รอบต่อนาที



(ง) 380 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 120 รอบต่อนาที



(จ) 450 องศาเซลเซียส 1 %โดยน้ำหนัก 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 360 รอบต่อนาที



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวณิศาธร นำเจริญพินิจ
วัน/เดือน/ปีเกิด	4 เมษายน 2533
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	32/27 เจริญรัช 16/1 คลองตันไทร คลองสาน กรุงเทพมหานคร 10600
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2551	ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนช่างตาครู้สคอนแวนท์
พ.ศ. 2555	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

