



กระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภันธ์ผสม
ประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบชั้นต่อนเดียว

CATALYTIC PYROLYSIS OF BIOMASS TO BIO-OIL PRODUCTION USING DUAL ACID-
BASE HETEROGENEOUS CATALYST IN A SINGLE STAGE FIXED BED REACTOR

สกลพัฒน์ แสงรุจี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2566

กระบวนการไฟโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑผสม
ประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบขั้นตอนเดียว



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

CATALYTIC PYROLYSIS OF BIOMASS TO BIO-OIL PRODUCTION USING DUAL ACID-
BASE HETEROGENEOUS CATALYST IN A SINGLE STAGE FIXED BED REACTOR



SAKONLAPAT SAENGRUJEE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Environmental Technology & Resources Management)
Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University

2023

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

กระบวนการไฟโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์ผสมประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบขั้นตอนเดียว

ของ

สกลพัฒน์ แสงรุจี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

..... ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทน์ งามนิยม)

ชื่อเรื่อง	กระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์ผสมประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบชั้นตอน เดียว
ผู้วิจัย	สกลพัฒน์ แสงรุจี
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ

การรับรู้และการตื่นตัวเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศและความเป็นกลางทางคาร์บอนทำให้ความสนใจวิจัยและพัฒนาพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นพลังงานและสารเคมีที่มีมูลค่า งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชีวมวลที่องค์ประกอบเป็นเนื้อไม้ และไม่มีเนื้อไม้ได้แก่ ชี้อ้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหรัย และกากกาแฟ ไปเป็นน้ำมันชีวภาพและสารเคมีที่มีมูลค่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์กรด-เบส ที่ภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ (500 – 600 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลของไนโตรเจน (25 – 75 มิลลิลิตรต่อนาที) เวลาในการไพโรซิส (45 – 75 นาที) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (3 – 10 % โดยน้ำหนัก) เพื่อศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับไพโรไลซิสของชีวมวลและวัสดุเหลือทิ้งไปเป็นน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบชั้นตอนเดียว และศึกษาอิทธิพลการเสริมหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์บนซีโอไลท์ และเหล็กบนโดโลไมต์ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก ผลการวิจัยพบว่าภาวะดำเนินการที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสไปเป็นน้ำมันชีวภาพสูงสุด คือ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาดำเนินการ 45 นาที เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์บนซีโอไลท์ และเหล็กบนโดโลไมต์ ในสัดส่วน 0.5 ต่อ 0.5 ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของสารชีวมวลที่เข้าสู่เครื่องไพโรไลซิสแบบเบดนิ่ง ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพจากสาหรัย 40.61 โดยน้ำหนัก กากกาแฟ 26.50 โดยน้ำหนัก และชี้อ้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส 20.19 โดยน้ำหนัก วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรเมตรี และแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปคโตรเมตรี เมื่อการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากสาหรัย สามารถจำแนกร้อยละของพื้นที่พีคที่เป็นสารประกอบแอลิฟาติก 24.51% แอโรมาติก 22.89% พอลิแอโรมาติก 26.72% และสารประกอบออกซิเจนเนท 25.88% ตามลำดับ

คำสำคัญ : ไพโรไลซิส, เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง, น้ำมันชีวภาพ, สารเคมีที่มีมูลค่า

Title	CATALYTIC PYROLYSIS OF BIOMASS TO BIO-OIL PRODUCTION USING DUAL ACID-BASE HETEROGENEOUS CATALYST IN A SINGLE STAGE FIXED BED REACTOR
Author	SAKONLAPAT SAENGRUJEE
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Witchakorn Charusiri

The awareness and perception of climate change and carbon neutrality has led to interest in the research and development of alternative energy sources, such as the conversion of agricultural waste/residual waste into clean energy and valuable chemicals. This research aimed to study the catalytic pyrolysis of woody and non-wood biomass such as eucalyptus sawdust, algae, and coffee grounds, in order to determine the optimal operating conditions for the catalytic pyrolysis of biomass and residual biomass to produce bio-oils and valuable chemicals in a fixed-bed reactor using a dual acid-base heterogeneous catalysts by varying the process operation conditions: temperature (500 – 600 °C), nitrogen flow rate (25 – 75 ml/min), reaction time (45 – 75 min), catalyst loading (3 – 10%wt. to the feedstocks) and investigated the synergistic effects of blending Fe-dolomite with Cu-ZSM-5, which was also achieved by wet impregnate method. The results found that the optimum operating condition for pyrolysis biomass and waste to bio-oil production at a temperature of 550 °C, a nitrogen flow rate of 50 ml/min and time of reaction 45 minutes when using the ratio of Cu-ZSM-5 and Fe-Dolomite of 0.5:0.5 at 5% catalyst loading with the feedstock obtained the highest bio-oil from algae at 40.61%wt., coffee grounds at 26.50%wt., and eucalyptus sawdust at 20.19 wt.%. The chemical properties of bio-oil from algae were analyzed using a Fourier Transform Infrared Spectrometry (FT-IR) and a Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). The percentage of area peak intensity divided the composition of bio-oil into four categories: aliphatic (24.51%), aromatic (22.89%), polyaromatic hydrocarbon (26.72%) and oxygenated compounds (25.88%).

Keyword : Pyrolysis, Fixed bed pyrolyzer, Bio-oil, Valuable chemicals

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เรื่องกระบวนการไฟโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภักดิ์ผสมประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบชั้นตอนเดียว ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีอย่างสมบูรณ์ ด้วยความกรุณาเอื้อเฟื้อในการให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์และการได้รับการสนับสนุนและช่วยเหลือจากหลายท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาคอยให้คำแนะนำ ดูแลตลอดการดำเนินงานวิจัยด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รองศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยใส่ใจดูแล ให้คำปรึกษา เสนอแนะความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัย ตั้งแต่เริ่มวางแผนการดำเนินงานวิจัย การวิเคราะห์ผลข้อมูล การติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินงานวิจัย รวมถึงคอยชี้แนะวิธีการแก้ไขปัญหาในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้อำนวยการโครงการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คุณสิริชัย รัตนวราหะ ผู้จัดการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คุณพสธร ขุนโอบษฐ์ นักวิทยาศาสตร์ และบุคลากรของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ในการสนับสนุน เอื้ออำนวยความพร้อมของสถานที่ ให้คำแนะนำ ดูแลตลอดการดำเนินงานด้วยความเอาใจใส่เพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่แนะนำความรู้ ข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานของคณะในการดำเนินการด้านเอกสารต่างๆ

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้ที่อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และผู้ที่อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่คอยให้กำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา และคณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจจะศึกษาหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ชีวมวล	7
2.2 แหล่งที่มาของชีวมวล.....	9
2.2.1 แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิ	9
2.2.2 แหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิ	9
2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของชีวมวล	10
2.3.1 เซลลูโลส	10
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส.....	11
2.3.3 ลิกนิน.....	12

2.3.4	แบ่ง.....	13
2.3.5	โปรตีน.....	13
2.4	คุณสมบัติของซีวมวล.....	13
2.4.1	ความชื้น.....	13
2.4.2	เถ้า.....	14
2.4.3	สารระเหยได้.....	14
2.4.4	คาร์บอนคงตัว.....	14
2.5	ค่าความร้อนของพลังงานซีวมวล.....	15
2.5.1	ค่าความร้อนต่ำ.....	15
2.5.2	ค่าความร้อนสูง.....	15
2.6	น้ำมันซีวภาพ.....	15
2.6.1	องค์ประกอบในน้ำมันซีวภาพ.....	16
2.6.2	การใช้ประโยชน์จากน้ำมันซีวภาพ.....	16
2.7	กระบวนการไพโรไลซิส.....	16
2.8	ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	18
2.8.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์.....	18
2.8.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์.....	19
2.9	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์.....	20
2.9.1	การเคลือบฝังหรือการชุบเคลือบ.....	20
2.9.2	การตกตะกอน.....	20
2.10	การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
2.10.1	การเผากระตุ้น.....	21
2.10.2	การรีดักชัน.....	21

2.11	ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	22
2.11.1	ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์/ซีโอไลต์	23
2.12	ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์	24
2.12.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/โคโลไมต์	25
2.13	การศึกษาอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกัน	25
2.14	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	31
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	35
3.3.1	การเตรียมตัวอย่างชีวมวล	35
3.3.2	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีของซีลี้อยจากซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับนำไปรูลิน่า และกากกาแฟ	35
3.3.3	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
3.3.4	การออกแบบการทดลอง	38
3.4	ขั้นตอนการทดลอง.....	38
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
4.1	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีเบื้องต้นของซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับนำไป รูลิน่า และกากกาแฟ	40
4.1.1	การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับนำไป รูลิน่า และกากกาแฟ ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก	41

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุของซีลีเนียมจากเศษไม้ยูคา ลิปตัส สหราชอาณาจักรไปรูลิน่า และกากกาแฟ	43
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	45
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดไลไมต์ก่อน-หลังแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง (Impregnation) เหล็กบนโดไลไมต์ และคอปเปอร์บนซีโอไลต์ด้วยเทคนิคเอกเรย์ดิฟ แฟรกชัน (X-ray diffractometer, XRD).....	46
4.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)	48
4.3 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไล ซิสเชิงตัวของตัวเร่งของสหราชอาณาจักรไปรูลิน่า กากกาแฟ และซีลีเนียมยูคาลิปตัส ด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยาผสมประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบขั้นตอนเดียว	50
4.3.1 ผลของของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไล ซิสเชิงตัวของซีลีเนียมยูคาลิปตัส	50
4.3.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	50
4.3.1.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์	51
4.3.1.3 ผลของเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	53
4.3.1.4 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	54
4.3.1.5 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละ ผลได้ของผลิตภัณฑ์	56
4.3.2 ผลของของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไล ซิสเชิงตัวของสหราชอาณาจักรไปรูลิน่า	58
4.3.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	58
4.3.2.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	59
4.3.2.3 ผลของเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	61

4.3.2.4	ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	62
4.3.2.5	ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	64
4.3.3	ผลของของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของกากกาแฟ	66
4.3.3.1	ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	66
4.3.3.2	ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	67
4.3.3.3	ผลของเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	69
4.3.3.4	ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	70
4.3.3.5	ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	72
4.4	การวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ	74
4.4.1	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพที่เกิดจากการไพโรไลซิส ซีลื้อยยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ.....	74
4.4.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	76
4.4.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	80
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	109
5.1	สรุปผลการทดลอง	109
5.2	ข้อเสนอแนะ	110
บรรณานุกรม	111
ภาคผนวก ก	114
ภาคผนวก ข	124

ภาคผนวก ค 129

ประวัติผู้เขียน..... 168



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับยาสไปรูลิน่า และกากกาแฟ	44
ตาราง 2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่เคลือบฝังด้วย โลหะทองแดงที่แตกต่างกัน และ ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ที่เคลือบฝังด้วยโลหะเหล็กที่แตกต่างกัน	49
ตาราง 3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับยาสไปรูลิน่า และกากกาแฟ	74
ตาราง 4 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากซีลี้อยยูคาลิปตัส	77
ตาราง 5 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากยาสไปรูลิน่า	78
ตาราง 6 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ	79
ตาราง 7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำชีวภาพจากซีลี้อยยูคาลิปตัส ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	80
ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำชีวภาพจากซีลี้อยยาสไปรูลิน่า ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ ที่อุณหภูมิ 550	

องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก..... 92

ตาราง 9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำชีวมวลจากกากกาแฟ ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 และที่อุณหภูมิ 600

องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ ที่อุณหภูมิ 550

องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก..... 100



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของซีวามวล	10
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	11
ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	12
ภาพประกอบ 4 โครงสร้างของลิกนิน	13
ภาพประกอบ 5 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์.....	22
ภาพประกอบ 6 ตัวเร่งปฏิกิริยาไดไลไมต์.....	24
ภาพประกอบ 7 ภาพผังแสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	30
ภาพประกอบ 8 เครื่องมือวัดความชื้น.....	31
ภาพประกอบ 9 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ	31
ภาพประกอบ 10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์.....	32
ภาพประกอบ 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
ภาพประกอบ 12 เครื่องวัดค่าความร้อน.....	33
ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
ภาพประกอบ 14 เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer.....	34
ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของซีลื้อจากยูคาลิปตัสในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ไนโตรเจน	41
ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของสาหร่ายสไปรูลิน่าในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ไนโตรเจน	41

ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของกากกาแฟในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ไนโตรเจน 42

ภาพประกอบ 18 XRD pattern ของ โดโลไมต์ และ เหล็ก/โดโลไมต์ 46

ภาพประกอบ 19 XRD pattern ของ ซีโอไลต์ และ คอปเปอร์ซีโอไลต์ 47

ภาพประกอบ 20 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของซีลื้อยยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อภาวะคองที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5.. 50

ภาพประกอบ 21 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของซีลื้อย ยูคาลิปตัส เมื่อภาวะคองที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 51

ภาพประกอบ 22 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของซีลื้อยยูคาลิปตัส เมื่อภาวะคองที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 53

ภาพประกอบ 23 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของ ซีลื้อยยูคาลิปตัส เมื่อภาวะคองที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 54

ภาพประกอบ 24 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของ ซีลื้อยยูคาลิปตัส เมื่อสภาวะคองที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 56

ภาพประกอบ 25 ผลการเสริมหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ของซีลื้อยยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 57

ภาพประกอบ 26 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อภาวะ
 คงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 58

ภาพประกอบ 27 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของสาหร่ายสไปรูลิน่า
 เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 59

ภาพประกอบ 28 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ
 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 61

ภาพประกอบ 29 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อภาวะ
 คงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และ
 เวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 62

ภาพประกอบ 30 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของ
 ผลิตภัณฑ์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อสภาวะคงที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของ
 แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ
 Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก..... 64

ภาพประกอบ 31 ผลการเสริมหักล้างกันของกระบวนการไฟโรไลซิสเชิงตัวเร่งของ Cu/H-ZSM5
 และ Fe/DM ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส
 ไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 65

ภาพประกอบ 32 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของกากกาแพที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อภาวะคงที่ ที่
 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที
 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาCu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่าง
 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 66

ภาพประกอบ 33 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของกากกาแพ เมื่อภาวะ
 คงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ
 Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5..... 67

ภาพประกอบ 34 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของกากกาแฟ เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5..... 69

ภาพประกอบ 35 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของกากกาแฟ เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5..... 70

ภาพประกอบ 36 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของกากกาแฟ เมื่อสภาวะคงที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก..... 72

ภาพประกอบ 37 ผลการเสริมหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 45 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 73

ภาพประกอบ 38 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากซีเลื้อยยุคาลิปต์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 76

ภาพประกอบ 39 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายสไปรูลิน่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5..... 77

ภาพประกอบ 40 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจจึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานหรือน้ำมันจากฟอสซิล (Fossil fuel) มากขึ้น และมีผลต่อการผลิตและการใช้พลังงานเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตจึงทำให้ปริมาณใช้น้ำมันปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ปริมาณสำรองของ น้ำมันปิโตรเลียมที่มีจำนวนจำกัด และมีแนวโน้มว่าจะมีการลดลงหรือไม่เหลือในอนาคต ในปัจจุบันโลกกำลังให้ความสนใจเกี่ยวกับการลดการปล่อยก๊าซพิษ จึงมีแรงผลักดันสำหรับการผลิตพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก ด้วยการใช้วิธีสลายตัวทางความร้อนโดยใช้ชีวมวล (Biomass) ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นหลัก ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โปรตีน และแป้ง ในการแปรผันขององค์ประกอบในการเกิดปฏิกิริยานั้นจะสลายเมื่ออุณหภูมิมีที่สูงขึ้น โดยสารชีวมวลสิ่งที่เหลือจากการเพาะปลูกทางการเกษตรกรรม โดยนำมาใช้ให้เกิดมูลค่าอย่างสมบูรณ์โดยการนำมาแปรรูปเป็นพลังงานทดแทน และยังช่วยส่งเสริมการในการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเชื้อเพลิงและชีวมวลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้น้อยกว่าเนื่องจากสารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการปลดปล่อยแก๊สมลพิษ ที่มีค่าความเป็นพิษต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากฟอสซิล อาทิเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นต้น

(กรมป่าไม้, 2554)ในปัจจุบันแนวโน้มเศรษฐกิจของอุตสาหกรรมจากไม้หรือตลาดผลิตภัณฑ์จากกระดาษ บรรจุกภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกำลังฟื้นตัวและเติบโต เนื่องจากในทุกกระบวนการผลิตจนถึงการบริโภคมีกระดาษเข้ามาเกี่ยวข้องเกือบทุกขั้นตอน โดยธุรกิจกล่องกระดาษและบรรจุกภัณฑ์กระดาษ เป็นกลุ่มที่ได้รับปัจจัยสนับสนุนจากการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ทำให้ผู้บริโภคลดการเดินทางออกจากที่พักและตัดสินใจซื้อสินค้าผ่านออนไลน์มากขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการบรรจุกภัณฑ์สำหรับการจัดส่งสินค้าให้แก่ผู้บริโภคจำนวนมาก เนื่องด้วยจากความต้องการใช้ทำให้กำลังผลิตก็ต้องมีเพิ่มมากขึ้น การใช้ทรัพยากรในการผลิตก็ต้องเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ในแต่ละปีมีเศษวัสดุเหลือทิ้งทั้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรมไม้และกระดาษเป็นจำนวนมาก ซึ่งการกำจัดสิ่งเหล่านี้เป็นจำนวนมากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง หรือสารตั้งต้นทางเคมีมูลค่าสูงให้ประโยชน์ได้ ก็จะช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน นอกจากนี้สาหร่าย (algae) จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ในชีวมวล ที่คาดว่าสาหร่ายจะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว เพราะว่าสาหร่ายนั้นมีการ

เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและใช้พื้นที่น้อยในการเพาะเลี้ยง นอกจากนี้สำหรับายังมีองค์ประกอบที่มีความใกล้เคียงกับชีวมวลชนิดอื่นๆ

กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานด้วยกระบวนการเชิงความร้อนมีหลายรูปแบบ เช่น ไพโรไลซิส แกซิฟิเคชัน ลิกวิแฟกชัน และอัตราการเผาไหม้ ซึ่งมีปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยาและให้ผลผลิตที่แตกต่างกันตามชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ การให้ความร้อน เวลา และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่มากในประเทศไทยมาแปรรูปเป็นน้ำมันชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง โดยเลือกใช้ปฏิกิริยาจากกระบวนการไพโรไลซิส โดยศึกษาหาความเหมาะสมของการแปรรูปชีวมวลจากเศษไม้และชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรซึ่งมีมากอยู่ในประเทศไทยให้เป็นน้ำมันชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสมและสามารถนำน้ำมันชีวภาพมาแปรรูปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ โดยจะนำผลการวิจัยมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนของประเทศ

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการแตกตัวหรือแตกสลายของสารประกอบหรือวัสดุต่างๆ ด้วยความร้อน ปานกลาง (400-800 องศาเซลเซียส) ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสภาวะที่เกิดขึ้นคือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลวมีลักษณะคล้ายน้ำมัน และ ของแข็งหรือถ่านชาร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ และอัตราเร็วในการให้ความร้อน ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสมักให้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthesis gas) ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสจึงมักนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้มาใช้ในการเป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการสลายตัวของสารที่ระเหยได้ง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ส่วนขั้นที่สองเป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามถ้าให้ความร้อนและเวลาที่มากเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบก็อาจกลับมารวมกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เป็นของแข็งเหนียวติดตามอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่ต้องการ โดยกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาในหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน(dehydration) การแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) ไอโซเมอไรเซชัน(isomerization) ดีไฮโดร- จีเนชัน (dehydrogenation) คอนเดนเซชัน (condensation) ถ่านชาร์ สารประกอบอินทรีย์ (organic compound) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนของแก๊ส

ของเหลว และของแข็งออกมา และเมื่ออุณหภูมิลดลง สารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (bio-oil) ส่วนแก๊สที่คงเหลืออยู่เป็นที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (non-condensable gas) และผลผลิตที่ได้ จะต้องทำให้เย็นลงในทันทีเพื่อป้องกันการแตกตัวของน้ำมันชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้ความร้อนที่ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป และต้องป้อนอากาศในปริมาณที่จำกัด แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สมีเทน (CH_4) และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆอีกเล็กน้อย ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการนี้ ได้แก่ ถ่าน และ ขี้เถ้า (ash) สำหรับส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำมัน น้ำ และน้ำมันดิน (tar)

ไพโรไลซิสจึงเป็นรูปแบบกระบวนการที่เหมาะสมกับการแปรรูปชีวมวลในรูปแบบที่ติดตั้งกระจายตามพื้นที่เพาะปลูกเป็นแนวทางในการส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลอย่างมีศักยภาพสูงสุด ซึ่งจะส่งเสริมแนวนโยบายในการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานและการลดปัญหาก๊าซเรือนกระจกของประเทศอีก ไบโอบอยล์หรือเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีคุณสมบัติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาได้โดยตรง หรืออาจพัฒนาปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงหรือสารเคมีอื่นๆ ได้ในอนาคต กระบวนการไพโรไลซิสเป็นหนึ่งในกระบวนการแปลงสภาพทางเคมีความร้อน เปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก และความดันบรรยากาศ เชื้อเพลิงเหลวเรียกว่าไบโอบอยล์ (Bio-oil) โดยทั่วไปมีค่าความร้อนประมาณ 22-25 MJ/kg ซึ่งสูงกว่าชีวมวลเริ่มต้นเนื่องจากของเหลวมีความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) สูงกว่าชีวมวลเริ่มต้นราว 2-3 เท่า ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อหน่วยพลังงานได้ กระบวนการไพโรไลซิสแปรรูปชีวมวลให้เป็นไบโอบอยล์ด้วยกระบวนการเชิงความร้อนมีหลายรูปแบบ ซึ่งมีปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยาและให้ผลผลิตที่แตกต่างกันตามชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลา และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่มากในประเทศไทยมาแปรรูปเป็นน้ำมันชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง ช่วยบรรเทาปัญหาด้านมลพิษทางอากาศและปัญหาภาวะโลกร้อนการการเผาไหม้ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่งอกก่อนที่เข้าสู่ฤดูกาลเพราะปลูกรอบใหม่

ในการศึกษาครั้งนี้จึงสนใจที่จะนำชีวมวลที่เหลือใช้ในประเภทต่างๆ เช่น ชีวมวลประเภทที่มีลักษณะเป็นเนื้อไม้ (woody biomass) ชีวมวลประเภทที่ไม่ใช่ลักษณะที่เป็นเนื้อไม้ (nonwoody biomass) เช่น กากกาแพ เป็นต้น และ ชีวมวลประเภทที่มีลักษณะเป็นพืชผลทางการเกษตร (agricultural waste after harvesting) เช่น สาหร่าย เป็นต้นไพโรไลซิสโดยใช้ ซีโอไลต์(H-ZSM5) และ โดโลไมต์(dolomite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภรณ์กรดและเบส ตามลำดับ

มาปรับปรุงความว่องไวโดยการเคลือบฝังโลหะช่วยทำให้บริเวณ Active site มีความว่องไวที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงตัวเร่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว ช่วยส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีออกซิเจนเนชัน คาร์บอนิลเลชัน คาร์บอกซิเลชัน และ โอลิโกเมอไรเซชันในขณะ ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิสูงช่วยให้ปฏิกิริยาโอลิโกเมอไรเซชัน และ แอโรมาติกเซชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะเพื่อศึกษาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดด้วยการออกแบบการทดลองแบบ univariate ในกระบวนการไพโรไลซิสของซีลื้อย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์ในขั้นตอนเดียว และศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง ร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของซีลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส กับการใช้สารชีวมวลและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ สหรัยสไปรูลิน่า และ กากกาแฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในการบวนการไพโรไลซิสซีลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟบนเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
2. ศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง ร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสซีลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์กรด-เบสในรูป ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในการบวนการไพโรไลซิสซีลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ โดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์ กรด-เบส ด้วย Cu-ZSM5 และ Fe-Dolomite บนเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง ร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในรูป ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์ เบดนิ่งแบบขั้นตอนเดียว ดังนี้

- 1.ศึกษาสมบัติทางกายภาพเคมีของซีลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ด้วยการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

- 2.ศึกษาผลของตัวแปร เพื่อหาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในการบวนการไพโรไลซิส ซีลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ โดยใช้ Cu/H-ZSM5 และ Fe/Dolomite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์กรด-กรด ได้แก่ อุณหภูมิที่ 500-600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25-75 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 45-75 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZSM5 ร้อยละ 3-10 โดยน้ำหนัก และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-Dolomite ร้อยละ 3-10 โดย

น้ำหนัก และปริมาณของโลหะคอปเปอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนัก และปริมาณของโลหะเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดไลไมต์ ร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนัก

3. ศึกษาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ สมบัติของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในรูปแบบ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูง

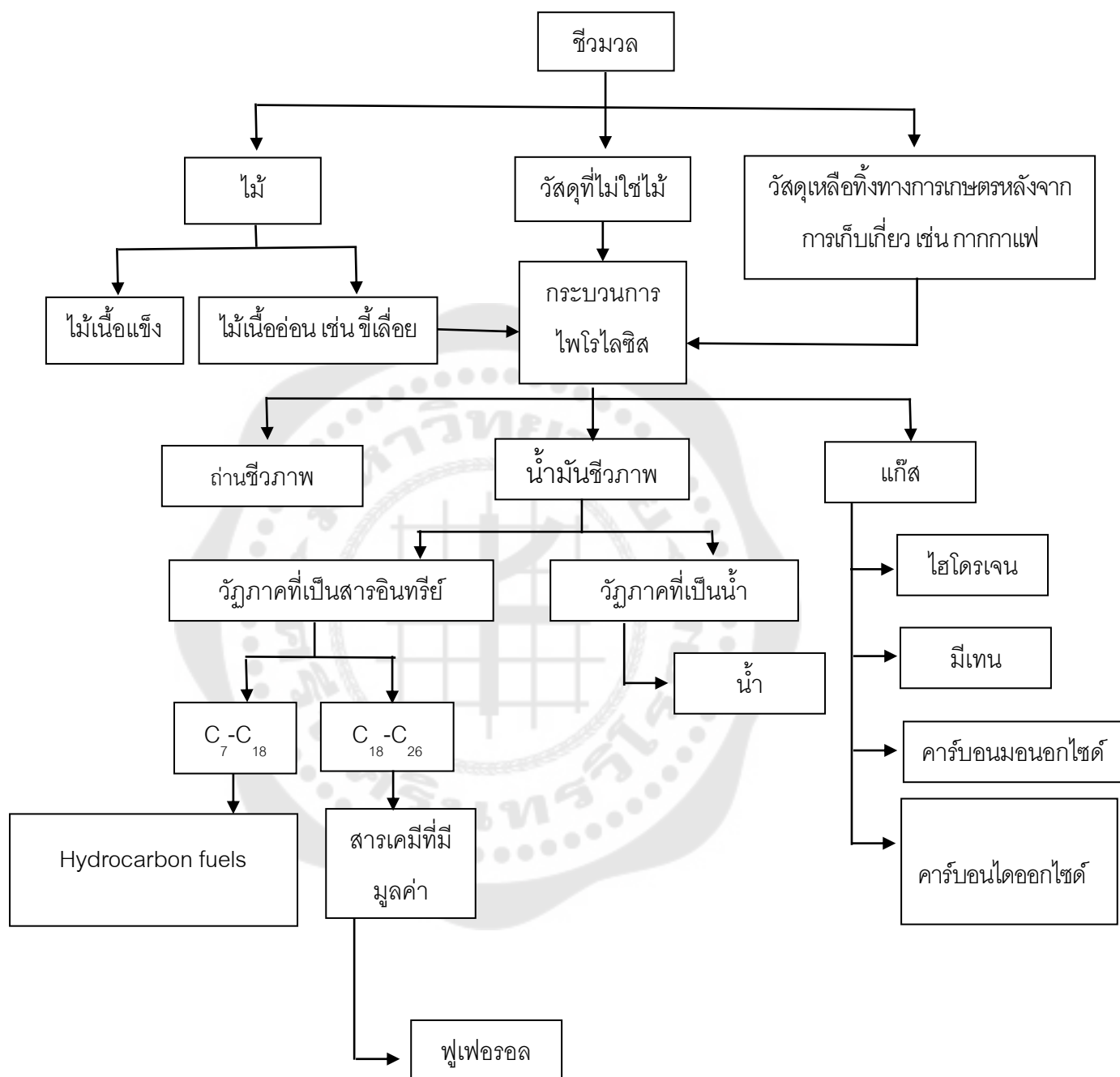
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในการกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งได้แยกเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและทราบว่าจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์จะส่งผลต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเหลวที่ดีที่สุด

2. เพื่อนำเศษวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่า

3. เพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาเป็นพลังงานทดแทนต่อไป

1.5 กรอบแนวคิดในงานวิจัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้มีการค้นคว้า รวบรวมข้อมูลทฤษฎี บทความทางวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฟโรไลซิสซึ่งได้มาจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ โดยใช้ ซีโอไลต์ และ โดโลไมต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภัณฑ์กรด-เบส โดยได้ศึกษาในหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล หรือ มวลชีวภาพ หมายถึง อินทรีย์สารใดๆของสิ่งมีชีวิตต่างๆซึ่งรวมทั้งมนุษย์พืชและสัตว์ซึ่งสิ่งมีชีวิตเหล่านี้สามารถนำมาเปลี่ยนรูปให้เกิดเป็นพลังงาน เช่น สัตว์เมื่อเสียชีวิตไปแล้วเกิดการเน่าเปื่อยย่อยสลายเป็นปุ๋ยช่วยให้พืชเจริญเติบโต ซึ่งเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งที่สะสมในสิ่งมีชีวิต และเน่าสลายผุพังเปลี่ยนรูปเป็นสารอินทรีย์สารที่ให้แต่พืช โดยการเติบโตของพืชจัดว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงมาเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่ง หรือ ตัวอย่างของไขมันสัตว์ที่สามารถนำไปสกัดเป็นน้ำมันสำหรับบริโภค รวมถึงแปรรูปเป็นแหล่งพลังงานหรือเชื้อเพลิงได้ จะเห็นได้ว่าในกรณีของพืชจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่เป็น แหล่งที่ใหญ่ที่สุด เนื่องจากสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ทุกส่วน นอกจากนี้หากเป็นพืชที่มนุษย์ปลูกขึ้นเพื่อการเกษตร เมื่อนำเอาส่วนที่ต้องการไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์แล้ว เศษที่เหลือหรือกากต่างๆ ก็สามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานได้เช่นกัน นอกจากนี้อาจพิจารณาได้ว่าการใช้พืชเป็นแหล่งสะสมพลังงานจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนรูปจากการสังเคราะห์แสงเติบโต และนำพืชไปใช้ประโยชน์จึงถือได้ว่าเป็นการนำเอาแหล่งพลังงานสำรองจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์การจำแนกชีวมวลสารสามารถจำแนกได้ตามลักษณะขององค์ประกอบ ได้ดังนี้

1. ชีวมวลประเภทที่มีลักษณะเป็นเนื้อไม้ สามารถพบเห็นได้ทั่วไป โดยเฉพาะตามแหล่งป่าไม้ต่างๆโดยป่าไม้เป็นแหล่งช่วยดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้ดีที่สุดสามารถกล่าวได้ว่าในช่วงการเจริญเติบโตของต้นไม้หนึ่งต้น ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้นไม้ช่วยดูดซับจากชั้นบรรยากาศเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง จะมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการนำเอาต้นไม้ต้นนั้นมาทำการเผาไหม้ ดังนั้นการนำเอาต้นไม้จากธรรมชาติหนึ่งต้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะไม่ทำให้ธรรมชาติเสียสมดุลในเรื่องของมลพิษแต่อย่างใด แต่ปัญหาของมลพิษที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศคือ มนุษย์มีการใช้พลังงานจากแหล่งอื่นโดยเฉพาะจากซาก ดึกดำบรรพ์ซึ่งทำให้มีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกและมลพิษต่างๆออกสู่ชั้นบรรยากาศ ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศตามมา นอกจากนี้การเผา

ใหม่เชื้อเพลิงจากฟอสซิลไม่มีกลไกดูดซับแก๊ส ที่เกิดจากการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดขึ้นได้ดี เทียบเท่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากชีวมวลที่มีกลไกดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อการเติบโตของพืช ในปัจจุบันปริมาณการใช้ไม้พืน หรือถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงในอุตสาหกรรมต่างๆ ลดปริมาณลงจนเหลือน้อยมาก เนื่องจากมีเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆที่สามารถให้พลังงานได้ดีกว่า ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดใหม่ในเรื่องของการทำป่าไม้คือ การปลูกพืชที่มีความแข็งแรง คงทน และโตเร็ว เพื่อนำเนื้อไม้ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่า เช่น อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และอุตสาหกรรมไม้แปรรูป ในขณะที่ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปไม้ เช่น ชี้เลื่อย เศษไม้และกิ่งที่ไม่ได้ขนาด ปีกไม้ และเปลือกไม้ ก็เป็นผลพลอยทางอ้อมที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนทั้งในรูปของพลังงานความร้อนโดยตรงหรือการนำไปผลิตความร้อนเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าต่อไป

2. ชีวมวลประเภทที่มีลักษณะเป็นพืชผลทางการเกษตร ในปัจจุบันมีการปลูกพืชทางการเกษตรจำพวก ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง หรือข้าวโพด เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งสิ่งที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจคือการนำพืชทางการเกษตรเหล่านี้มา แปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว นอกจากนี้ยังมีการปลูกพืชทางการเกษตรชนิดอื่นๆ เพื่อใช้เมล็ดไปสกัดเป็นน้ำมัน อย่างเช่น ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ หรือพืชตระกูลถั่วต่างๆ โดยสามารถเปลี่ยนน้ำมันจากพืชเหล่านี้ไปเป็นน้ำมันไบโอดีเซล และสามารถนำน้ำมันนี้ไปใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่ผลิตได้จากการกลั่นเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ การสร้างแหล่งพลังงานแบบที่มีลักษณะเป็นพืชผลทางการเกษตรนี้ จะมีข้อได้เปรียบกว่าการสร้างแหล่งพลังงานแบบที่มีลักษณะเป็นไม้ เพราะไม่มีความยุ่งยากในการเพาะปลูก และวงจรการใช้พื้นที่เพื่อการเพาะปลูกมีความยืดหยุ่นและเหมาะต่อการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวผลผลิตได้มากกว่า เนื่องจากพืชผลทางการเกษตรเหล่านี้มีวงจรในการเพาะปลูกและการเก็บเกี่ยวที่สั้นกว่า

3. ชีวมวลประเภทที่มีลักษณะเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ภายหลังจากเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร หรือในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในโรงงานอุตสาหกรรม จัดว่าเป็นชีวมวลที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงาน ตัวอย่างเช่น เศษไม้ ชี้เลื่อย ชัง หรือเปลือก หรือส่วนประกอบของพืชต่างๆ ที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ถือว่าเป็นแหล่งพลังงานจากชีวมวลอีกรูปแบบหนึ่ง วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้ถูกเลือกนำมาใช้งานเป็นแหล่งพลังงาน หรือการใช้ประโยชน์ตั้งแต่ระดับในครัวเรือน ระดับชุมชน จนกระทั่งระดับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะเห็นได้ว่าชีวมวลเหล่านี้มีปริมาณที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์และศักยภาพในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน หรือใช้เป็นพลังงานร่วมกับเชื้อเพลิงทั่วไป ตัวอย่างเช่น เศษไม้ เพราะ

ในการแปรรูปไม้โดยทั่วไปต้องการใช้แต่เนื้อไม้ ในขณะที่ใบ กิ่ง ก้านต่างๆที่ไม่ได้ขนาดไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่การริดกิ่ง ก้าน ใบ เหล่านั้นไว้ในสวนป่าเพื่อความสะดวกในการลำเลียงลำต้นไม้มายังโรงงานแปรรูปไม้ รวมถึงเปลือกไม้ เศษไม้ที่ไม่ได้ขนาด ชี้เลื่อย ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแปรรูปเนื้อไม้ สิ่งเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทั้งในรูปของพลังงานความร้อนและการผลิตไฟฟ้าหรือนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าได้

2.2 แหล่งที่มาของชีวมวล

พืชจัดว่าเป็นสิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารได้เองจากกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมาสร้างเป็นสารประกอบอินทรีย์ แบ่ง น้ำตาล และออกซิเจน โดยมีพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารประกอบอินทรีย์ที่สร้างขึ้นพืชจะใช้ในการดำรงชีวิต บางส่วนที่เหลือบางส่วนที่เหลือจะเก็บสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ได้แก่ ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล และเมล็ด แหล่งของชีวมวลมาจากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ แบ่งได้เป็น 2 แหล่ง คือ

2.2.1 แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิ

แหล่งพลังงานชีวมวลจากพืช ได้แก่ ไม้ชนิดต่างๆ ทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง สามารถพบได้ทั่วไปตามแหล่งป่าไม้ต่างๆ พืชล้มลุก พืชน้ำมัน วัชพืชบกและน้ำ พืชผลทางการเกษตร จำพวกข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด รวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร เช่น เศษไม้ ชี้เลื่อย ชั่งหรือเปลือก โดยนำสิ่งเหล่านี้มาใช้เป็นแหล่งพลังงาน หรือใช้เป็นพลังงานร่วมกับเชื้อเพลิงทั่วไป เช่น โรงงานน้ำตาลใช้กากอ้อยจากการหีบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำหรือผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงาน

แหล่งพลังงานชีวมวลจากสัตว์ ได้แก่ มูลสัตว์ต่างๆ น้ำชะล้างมูลสัตว์ รวมถึงของเสียต่างๆในฟาร์ม โดยนำสิ่งเหล่านี้มาผลิตไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ด้วยการหมักมูลสัตว์และน้ำเสียที่เกิดในฟาร์มเลี้ยงสัตว์มาย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศเป็นแก๊สชีวภาพมาใช้เป็นพลังงานในรูปของความร้อนโดยตรง หรือนำไปผลิตเป็นไฟฟ้าในฟาร์มหรือจำหน่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าต่อไป

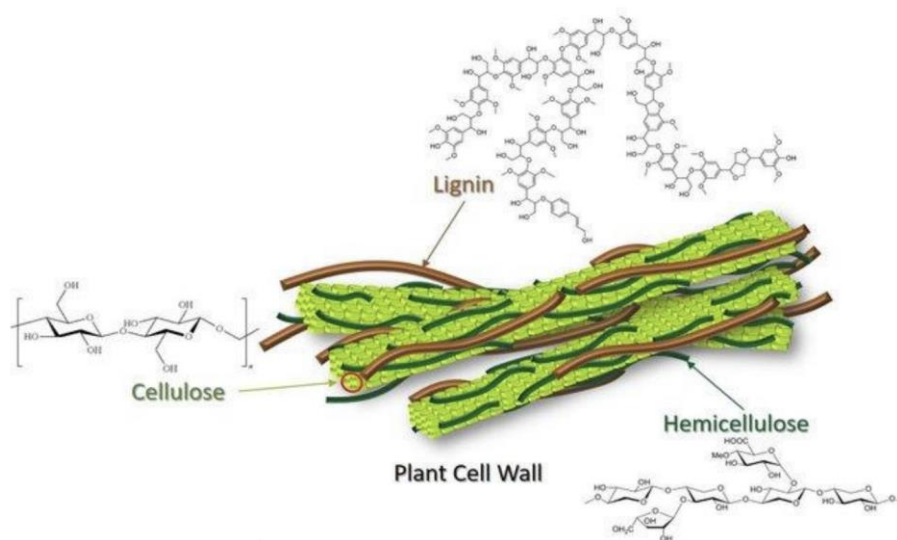
2.2.2 แหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิ

เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลจากขยะและของเสียอุตสาหกรรม เช่น พืชผักต่างๆ รวมถึงเศษอาหาร ของเสียจากการแปรรูปอาหาร โดยนำสิ่งเหล่านี้มาแปรรูปเป็นพลังงานทดแทน ด้วย

การนำขยะมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง RDF การนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสีย กากน้ำเสีย กากน้ำมัน ไขมัน ซึ่งสามารถรวบรวมและบำบัดโดยใช้วิธีการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน ให้แก๊สมีเทน รวมถึงสามารถลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก

2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของชีวมวล

วัสดุลิกโนเซลลูโลสิก เป็นองค์ประกอบของชีวมวล ที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส หรือเรียกรวมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้ว่า ลิกโนเซลลูโลส ลิกนิน แอ็ง และโปรตีน เป็นต้น โครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลสิก แสดงในภาพประกอบที่ 1 โดยมักพบองค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลสร้อยละ 40-60 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20-40 และ ลิกนินร้อยละ 10-25 (McKendry, 2002)



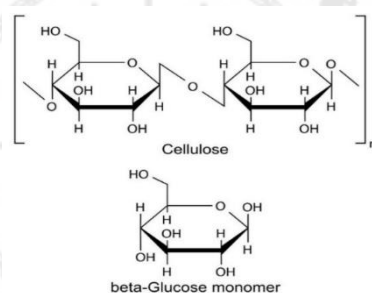
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างและองค์ประกอบหลักของชีวมวล

ที่มา: (Jansen et al., 2017)

2.3.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในผนังเซลล์ของพืช คิดเป็นร้อยละ 40-60 ของน้ำหนัก ตัวอย่างพืชในหน่วยน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยสารคาร์โบไฮเดรต ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน เรียกว่า โฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประมาณ 200,000-2,000,000 สูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_6)_n$ โดยที่ n คือ ระดับของของ พอลิเมอร์โซ่ที่ทำให้เกิดเซลลูโลส ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl

group) เป็นหมู่หลักมาเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) เป็นสายโซ่ยาว ลักษณะที่เป็นเส้นตรงประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสหรือจำนวน degree of polymerization (สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557) โมเลกุล ภายในองค์ประกอบของเซลลูโลสจะมีหน่วยซ้ำที่เรียกว่า เซลโลไบโอส (cellobiose) และทุกหน่วยที่สองของกลูโคสที่ต่อกันในโมเลกุลของเซลลูโลสจะสามารถหมุนได้ 180 องศาเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล ส่งผลให้เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำ ภายในโครงสร้างเซลลูโลสจะมีการยึดเกาะเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า microfibril สร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของพืช การที่โครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่มีพันธะกิ่ง ทำให้สายโซ่เซลลูโลส สามารถจัดเรียงซ้อนกันได้เป็นเส้นใยอย่างมีระเบียบ เซลลูโลสจึงมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อการกรดและด่าง แสดงในภาพประกอบ 2 ทำให้มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงและย่อยสลายได้ยากกว่าแป้ง ที่มีลักษณะเป็นเส้นโซ่เกลียว



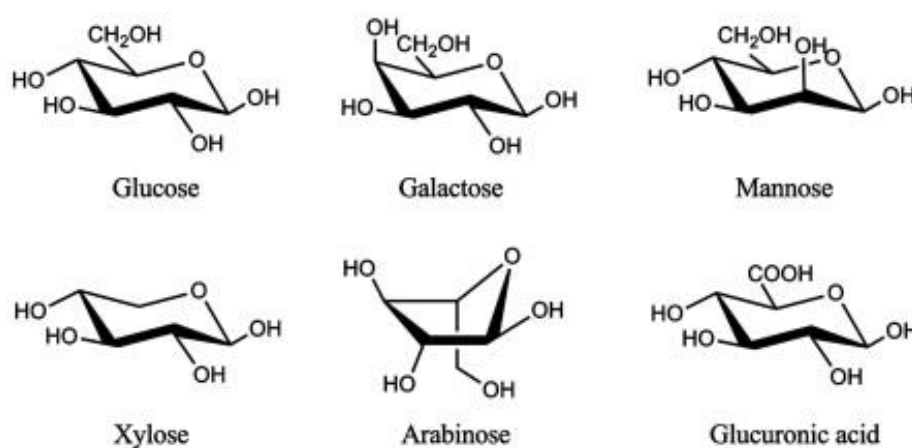
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: (วิชากร, 2561)

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลิเมอร์ที่สำคัญอันดับสองในชีวมวลของพืชรองจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยโมโนแซคคาไรด์ที่แตกต่างจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ไม่เพียงประกอบด้วยหน่วยกลูโคสเท่านั้น แต่ยังประกอบด้วยมอโนแซ็กคาไรด์เพนโทส และเฮกไซส อีกจำนวนหนึ่ง เฮมิเซลลูโลสถือว่าเป็นประเภทของ Heteropolysaccharides มีโครงสร้างที่ซับซ้อน รวมทั้งน้ำตาลกลูโคสเป็น ไฮโลส แมนโนส กาแลคโต ฟรุคโตส และกรดกาแลค ในปริมาณต่างๆ ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล 50 และ

200 หน่วยจึงมี แนวโน้มที่จะสั้นกว่าเซลลูโลสมาก โดยมีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ $(C_5H_8O_4)_n$ แต่พบว่า มีระดับของ พอลิเมอร์ไซชันที่ต่ำกว่าเซลลูโลส จึงทำให้เกิดการสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และละลายน้ำ ได้ดีกว่าเซลลูโลสอีกด้วย โดยจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200-260 องศาเซลเซียสทำให้เป็นสารระเหยได้มากกว่า และมีการเกิดชาร์ และชาร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Carrier et al., 2020)

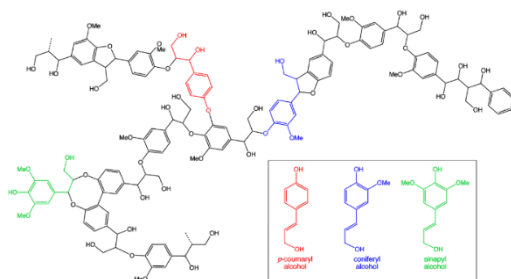


ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: (Li et al., 2017)

2.3.3 ลิกนิน

ลิกนิน ซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างไม่แน่นอน โดยลิกนินจะประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของฟีนิลโพรเพน(phenylpropane) เป็นโพลีเมอร์ของหน่วยโพรพิลฟีนอล เชื่อมกันเป็นโครงสร้างแบบสามมิติ แต่มีมอนอเมอร์ที่สามารถแบ่งหน่วยย่อยของลิกนินได้ โดยลิกนินทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง นอกจากนี้การสลายตัวทางความร้อนของลิกนินด้วยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 280-500 องศาเซลเซียส (Jeon et al., 2013)



ภาพประกอบ 4 โครงสร้างของลิกนิน

(ที่มา: <http://howaboutlignin.blogspot.com/2013/07/lignin-structure.html>)

2.3.4 แป้ง

สารประกอบลักษณะคล้ายกับเซลลูโลส แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลูโคไซด์ิก เพราะความแตกต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้งจะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ของแป้ง) และบางส่วนที่ไม่ละลาย (อะไมโลเพกทิน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 100,000 ของแป้ง) แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น

2.3.5 โปรตีน

โปรตีน เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์ (หรือพันธะเปปไทด์) ทำให้มีสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนที่อยู่ภายในโครงสร้างนั้น โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของชีวมวลทั่วไปแต่จะพบในชีวมวลบางประเภท เช่น สาหร่าย เป็นต้น

2.4 คุณสมบัติของชีวมวล

คุณสมบัติของชีวมวล สมบัติทางกายภาพและธาตุองค์ประกอบของชีวมวลทั่วไป มักส่งผลต่อกระบวนการแปรสภาพชีวมวลไปเป็นพลังงาน โดยทั่วไปการวิเคราะห์สมบัติตัวอย่างชีวมวล ได้แก่ ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว อาจวิเคราะห์ตามลักษณะของชีวมวลที่ได้มา (วิชากร จารุศิริ, 2561)

2.4.1 ความชื้น

ความชื้น หรือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ภายในเชื้อเพลิงชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มักแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักทั้งหมดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่อาจคำนวณได้ทั้งแบบฐานเปียก (wet basis) และแบบฐานแห้ง (dry basis) ที่มีวิธีการแตกต่างกัน

ตามการได้มาของเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนนำมาวิเคราะห์ตามมาตรฐาน American Society Testing and Materials (ASTM)

2.4.2 เถ้า

เถ้า เป็นปริมาณสารอนินทรีย์ที่มีภายในเชื้อเพลิงชีวมวลที่เกิดขึ้นภายหลังการเผาไหม้หรือการสลายตัวเชิงความร้อนหรือเชื้อเพลิงชีวมวล หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่หมด สามารถแสดงปริมาณเถ้าโดยคำนวณแบบฐานแห้ง ในการเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งพลังงาน ปริมาณเถ้ามักเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงก่อนการเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากเถ้ามีปริมาณ องค์ประกอบ และลักษณะทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน หากเชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณเถ้ามาก การลำเลียงเถ้าออกจากระบบเผาไหม้ อาจทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนต่ำลง หรือ เชื้อเพลิงชีวมวลบางประเภทอาจมีสารแอลคาไลน์เป็นองค์ประกอบและสามารถให้เถ้าที่มีสารประกอบอนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันในระบบเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เถ้าเกิดการหลอม ละเปลี่ยนสภาพทางกายภาพเป็นเถ้าหลอม (slagging) ซึ่งอาจมีผลต่อระบบเผาไหม้ทั้งการทำให้เกิดการอุดตันในระบบเผาไหม้ รวมถึงประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่ลดลงอย่างมาก

2.4.3 สารระเหยได้

สารระเหย การสลายตัวเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมักเกิดการแตกสลายในช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส มีช่วงอุณหภูมินี้ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสองช่วง คือ ช่วงการเกิดเป็นไอของสารระเหย (volatile vapour) ซึ่งแบ่งออกเป็นไอของสารระเหยที่ควบแน่น (condensable volatile) และไอของสารระเหยที่ควบแน่นไม่ได้ (noncondensable volatile) และช่วงที่สองเป็นช่วงการเกิดเป็นเถ้าที่ไม่สามารถสลายตัวจากปฏิกิริยาเชิงความร้อน รวมถึงถ่านชาร์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารระเหยได้ออกไปจากตัวเนื้อเชื้อเพลิงชีวมวลแล้ว โดยการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM จะควบคุมอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิ

2.4.4 คาร์บอนคงตัว

คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) เป็นของแข็งส่วนที่เหลือจากการสลายตัวเชิงความร้อน โดยหักลบออกจากปริมาณร้อยละของความชื้น สารระเหย และขี้เถ้า ทำให้คาร์บอนคงตัวจะมีความแตกต่างจากชาร์ เนื่องจากคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เหลือจากการสลายตัวเชิงความร้อนขณะที่ชาร์เกิดจากการสลายตัวเชิงความร้อนในที่อับอากาศหรือปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เกิดการแตก

สลายให้เกิดสารระเหยในรูปแก๊สดังนั้นส่วนประกอบของคาร์บอนจะมีทั้งคาร์บอนคงตัวและสารระเหยที่สลายตัวเชิงความร้อนไม่หมดหรือไม่สลายตัว

2.5 ค่าความร้อนของพลังงานชีวมวล

ค่าความร้อน (heating Value) ของชีวมวลเป็นปัจจัยที่บ่งบอกปริมาณของพลังงานที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวลหรือพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1 ค่าความร้อนต่ำ

ค่าความร้อนต่ำ (low Heating Value, LH) คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยคำนึงถึงปริมาณน้ำในวัฏภาคแก๊สหรือไอ โดยที่หักค่าพลังงานจากการระเหยของน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้

2.5.2 ค่าความร้อนสูง

ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HH) คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยคำนึงถึงปริมาณน้ำในวัฏภาคของเหลวที่เกิดจากความชื้น

โดยทั่วไปหน่วยของค่าความร้อน คือ กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg) หรือเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) และค่าความร้อนของพลังงานส่วนใหญ่มักแสดงในหน่วยค่าความร้อนสูง (Yin, 2011)

2.6 น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน และยังเป็นอีกเชื้อเพลิงชีวภาพที่สำคัญซึ่งได้รับการสลายตัวเชิงความร้อนชีวมวล เช่น ไพโรไลซิส น้ำมันชีวภาพได้รับการพิจารณาเป็นวัตถุดิบที่มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานสูง และความสะอาดสลายในการจัดเก็บหรือการขนส่งเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ก๊าซ นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังสามารถย่อยสลายได้ CO₂ หรือก๊าซเรือนกระจกที่เป็นกลางและสร้าง NO_x และ SO_x เมื่อเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่ใช้ปิโตรเลียม น้ำมันชีวภาพจึงเป็นเชื้อเพลิงที่มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมการผลิตน้ำมันชีวภาพจนถึงปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม น้ำมันชีวภาพที่ได้รับไม่สามารถนำมาใช้โดยตรงเป็นเชื้อเพลิงขนส่งเนื่องจากการที่มีความหนืดสูงปริมาณออกซิเจนสูง การกัดกร่อนสูง และความไม่แน่นอนของความร้อน คุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ไม่ดีเกิดจากการมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งทำให้เกิดน้ำมันชีวภาพที่มีออกซิเจน และเป็นกรดสูงซึ่งต้องได้รับการปรับสภาพก่อนการใช้งาน

2.6.1 องค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ หรือที่เราเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าน้ำมันไพโรไลซิส มีลักษณะเป็น ของเหลวสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม มีสารประกอบของไฮโดรคาร์บอน และออกซิเจนใน ปริมาณมาก โดยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮน์ แอนไฮดริด์ ฟิวเรน คีโตน และกรดอะซิติก เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้เกิดจากการไพโรไลซิสชีวมวล เมื่อสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จะได้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นกลับมาอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมระหว่างสารอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ที่มีร้อยละอยู่ที่ เป็นของเหลว 70-85 เปอร์เซ็นต์ และอีกร้อยละ 15-30 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำมันชีวภาพเป็น สารประกอบที่สามารถ ละลายได้ในน้ำ เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน แต่จะไม่สามารถ ละลายได้ในน้ำมัน ไฮโดรคาร์บอน โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที ต้องมีการปรับปรุง และพัฒนาน้ำมันชีวภาพก่อน (Hu & Gholizadeh, 2019)

2.6.2 การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพ

การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพนั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงหรือพัฒนาให้ มีสมบัติที่ดีขึ้นก่อนนำไปใช้ โดยปัจจุบันการพัฒนาน้ำมันชีวภาพนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อตอบสนองของความต้องการใช้ในด้านพลังงานทดแทน โดยการผลิตน้ำมันชีวภาพและแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลนั้น สามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสะอาดได้เมื่อเทียบกับ การใช้ชีวมวลแข็งและการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊ส พบว่าการผลิตแก๊สใน ปริมาณมากนั้นจำเป็นต้องใช้ชีวมวลในปริมาณที่สูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาของเถ้าที่สูง ตามมา แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารตั้งต้นแทน จะทำให้ได้ปริมาณเถ้าลดน้อยลง นอกจากนี้ยังมี ปัญหา ในด้านการขนส่งพบว่าเมื่อการใช้ชีวมวลเป็นสารตั้งต้นต้องใช้ ระบบในการขนส่งที่และพื้นที่ จัดเก็บในปริมาณมากเมื่อเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในปริมาณอัตราส่วนเท่าๆกัน จึงสามารถลดต้นทุนที่เกิดจากส่วนนี้ลงได้

2.7 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่ทำให้เกิดการ แตกตัวหรือสลายตัวของสารชีวมวลและสารประกอบต่างๆ ให้มีขนาดเล็กด้วยความร้อนที่สภาวะ ไร้ออกซิเจน และเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงเคมีแบบผันกลับไม่ได้ โดยทั่วไปไพโรไลซิสจะเกิดได้ ดีที่สภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 300-650 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ แบ่งออกเป็น 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่เป็น ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะมี ลักษณะคล้ายน้ำมันหรือน้ำมันชีวภาพ น้ำมันทาร์ และผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ได้เป็น ถ่านชาร์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนขององค์ประกอบภายในชีวมวล ซึ่งความร้อนที่มีพลังงานเพียงพอ จะทำให้สารระเหยถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของชีวมวล เกิดเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้คือทาร์ และเกิดเป็นของแข็งคือชาร์ ส่วนสารระเหยที่ไม่ควบแน่นจะได้รับความร้อนที่ทำให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อน และเกิดการควบแน่นรวมเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลวและทาร์บางส่วนเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนไปเป็นแก๊สที่ไม่ควบแน่น

กระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่

1. ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นกระบวนการดั้งเดิมที่ถูกนำมาแปรรูปเพื่อผลิตถ่านจากไม้ โดยให้อุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในภาวะดำเนินการ อุณหภูมิต่ำประมาณ 400 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 3-10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในภาวะไร้ออกซิเจน/อากาศและใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมงในการสลายตัวเชิงความร้อนภายในองค์ประกอบของชีวมวลเพื่อเพิ่มผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ โดยมีอัตราการให้ความร้อนช้าหรือรักษาอุณหภูมิให้คงที่ จะให้ผลิตภัณฑ์ทั้งในรูปของแก๊ส ของเหลวและชาร์ หากควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และมีอัตราการให้ความร้อนช้าจะส่งผลให้เกิดถ่านชาร์มากขึ้นแต่สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่ไม่ต้องการให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง มักจะมีสภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ และใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง

2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของเหลว หรือน้ำชีวภาพ โดยการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงสุดแก่ชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจน/อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอน และน้ำ โดยปริมาณน้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นและการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ

3. แฟลชไพโรไลซิส

กระบวนการแฟลชไพโรไลซิส (flash pyrolysis) เหมือนกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ มีอุณหภูมิอยู่ที่ 400-600 องศาเซลเซียส แต่จะมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยระยะเวลาสั้นมาก (ประมาณ 1 วินาที หรือน้อยกว่า) โดยภายใต้ภาวะ

ดำเนินการนี้ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสมีประมาณร้อยละ 70-75 และมีร้อยละผลได้ของ ของแข็งหรือถ่านชาร์เกิดขึ้นในปริมาณน้อย

4. ไฮโดรไพโรไลซิส

กระบวนการไฮโดรไพโรไลซิส (hydro pyrolysis) เป็นการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่มีการอัดความดัน แต่ใช้ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 150-220 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสจะเกิดเป็นของเหลวโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอนุมูลอิสระ (free radical) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวของชีวมวล ทำให้เกิดความเสถียร และมีการรวมตัวเป็นถ่านชาร์ในปริมาณที่ลดลงของเหลวหรือน้ำมันจากกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าประเภทอื่น

5. ไฮดรอลไพโรไลซิส

กระบวนการไฮดรอลไพโรไลซิส (hydrous pyrolysis) เป็นการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลในตัวกลางที่เป็นน้ำร้อนอัดความดัน ทำให้ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ร่วมกับปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮดรอลไพโรไลซิสเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบจำพวกออกซิเจนเนต หรือมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารที่เติมลงไปในการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น หรือทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วยหรือไม่ก็ได้แต่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะต้องมีปริมาณเท่าเดิม และมีสมบัติเหมือนตอนเริ่มต้น รวมทั้งทำหน้าที่เร่งอัตราเร็วในการเกิดหรือแตกออกของพันธะเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณและควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์เฉพาะตามต้องการ โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalysts) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts)

2.8.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalysts) (นพิตา หิณูชีระนันท์, 2556) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่สถานะ เดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งของแข็งหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ เอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งที่แน่นอนเพื่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจนและ รวดเร็ว รวมไปถึงง่ายต่อการศึกษา เนื่องจากการวิเคราะห์

สารในกระบวนการต่างๆ สารละลายทำได้ง่ายด้วยใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์เป็นที่นิยมน้อย่างกว้างขวางและเป็นที่น่าสนใจในวงกว้างเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์มีความสามารถในการเลือกที่สูง (Selectivity) และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่เป็นการคายความร้อน แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ คือเกิดการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพได้ง่ายในภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูง รวมไปถึงการแยกผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยานั้นทำได้ยาก

2.8.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysts) (นพิตา หิฎฐีระนันท์น, 2556) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่สถานะ แตกต่างกับสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ เช่น สารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเป็น ของเหลวหรือแก๊ส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นิยมใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมจำพวก เชื้อเพลิง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์เป็นของแข็งมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี ทนทานต่ออุณหภูมิและความดันสูง และยังสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแบบวิวิธพันธุ์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไวของปฏิกิริยา และส่วนที่สองคือตัวรองรับ มักมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้เกิดการ ว่องไว แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีเพียงส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไวของปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่ง ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบัลค์ (bulk catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวรองรับ (unsupported) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบทางเคมีทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกัมมันต์กระจายอยู่ใน โครงสร้างหรือผลึก เช่น TiO_2 , ZnO , CaO และ MgO เป็นต้น ตัวเร่งเหล่านี้ไม่มีรูพรุน ภายในโครงสร้าง จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงนัก

- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ (supported catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ประกอบด้วย โลหะกัมมันต์กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับ (support) เช่น $\text{Pt} / \text{Al}_2\text{O}_3$, Pt / C และ $\text{MoS} / \text{Al}_2\text{O}_3$ โดยโลหะกัมมันต์ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาหลัก (main reaction) ส่วนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ในบางกรณีช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ของโลหะกัมมันต์ได้ ตัวรองรับบางชนิดเช่นตัวรองรับชนิดกรด (acid support) ยังทำหน้าที่ เร่งปฏิกิริยาได้ด้วยจึงถูกใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่(bifunctional catalysts)

2.9 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysts preparation) (นพิตา วิทยุธีระนันท์, 2556) ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยมี 2 วิธีหลักๆ ดังต่อไปนี้

2.9.1 การเคลือบฝังหรือการชุบเอ็บ

การเคลือบฝังหรือการชุบเอ็บ (impregnation) คือวิธีการกระจายวัฏภาคกัมมันต์บนพื้นผิวของตัวรองรับ เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการกรองและการล้างจึง ซึ่งเหมาะกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารตั้งต้นโลหะกัมมันต์ต้องละลายได้ดีในน้ำหรือตัวทำละลายอื่น ๆ ที่เหมาะสม ปริมาตรและความเข้มข้นของสารละลายโลหะส่งผลต่อ อนุภาคโลหะที่ติดบนผิวของตัวรองรับ โดยทั่วไปกำหนดปริมาตรของสารละลายที่ใช้ให้ใกล้เคียง กับปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับเพื่อให้โลหะกัมมันต์ทั้งหมดในสารละลายเติมเต็มภายในรูพรุน พอดีเรียกวินี้ว่าอิมเพกเนชันแบบเปียกพอดี (Incipient wetness impregnation) ตัวรองรับที่ เหมาะสมสำหรับการพอกพูนด้วยวิธีนี้

2.9.2 การตกตะกอน

การตกตะกอน เป็นวิธีการพอกพูนโลหะกัมมันต์ที่ละลายในตัวกลางของเหลวลงบนตัวรองรับโดยทำให้ไอออนของโลหะกัมมันต์ตกตะกอนอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ (metal hydroxide) หรือโลหะคาร์บอเนต (metal carbonate) ผ่านการปรับค่ากรด-เบสของ ระบบให้เหมาะสมโดยเติมสารละลายเบสมีลักษณะเป็นผงหรือเม็ดที่ผ่านการอบแห้งหรือการเผาเพื่อไล่ความชื้นและสิ่งปนเปื้อนออกแล้ว นำไปกวนผสมกับสารละลายเกลือ โลหะกัมมันต์ทำให้ได้ของผสมแขวนลอย (slurry) จากนั้นค่อยๆ เทหรือหยดสารละลายเบสลงไปจนค่ากรด-เบสของของผสมสูงขึ้นไอออนของโลหะที่ใช้เป็นสารตั้งต้นจะตกตะกอนภายในรูพรุนของตัวรองรับ เมื่อนำของแข็งไปอบแห้งเพื่อไล่ตัวทำละลายและเผาเพื่อสลายเกลือโลหะตะกอนโลหะกัมมันต์จะแปรสภาพเป็นโลหะออกไซด์บนตัวรองรับ ซึ่งมีความสำคัญมากเนื่องจากไอออนบางชนิดที่ตกค้างในตัวเร่งปฏิกิริยามักจะส่งผลที่ไม่พึงประสงค์แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้

2.10 การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา

การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการเตรียมที่กล่าวแล้วข้างต้นยังไม่พร้อมนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น แอนไอออนตกค้างอยู่บนตัวรองรับ สถานะออกซิเดชันของโลหะกัมมันต์ยังไม่เหมาะสมการเกิดโลหะออกไซด์ผสมที่มีโครงสร้างเฉพาะต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์สูง หรือ ต้องการเพิ่มสมบัติเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อแปรสภาพ หรือเปลี่ยนโลหะกัมมันต์ ให้มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบทาง เคมี

ในรูปแบบที่มีกัมมันตภาพสูงจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำได้หลายวิธีขึ้นกับชนิดของโลหะกัมมันต์ ซึ่งที่พบบ่อย ได้แก่ การเผากระตุ้น การรีดักชัน

2.10.1 การเผากระตุ้น

การเผากระตุ้น (calcination) เป็นการให้ความร้อนปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่มี อากาศหรือในบรรยากาศของแก๊สชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายหลังจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และการเผากระตุ้นยังเป็นขั้นตอนสำคัญของการเตรียมตัวรองรับและวัสดุของแข็งที่มีพื้นที่ผิวสูงและสมบัติเชิงกลที่ดีวัตถุประสงค์ของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายประการ ดังต่อไปนี้

- ความร้อนจากการเผาช่วยสลายแอนไฮดรอกไซด์ออกจากสารตั้งต้น ตกค้างบนตัวรองรับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังช่วยกำจัดสารเจือปนทำให้รูพรุนจำนวนมากภายในโครงสร้างเปิดออก
- การเผาตะกอนโลหะในอากาศทำให้สารประกอบโลหะแปรสภาพเป็นโลหะออกไซด์ซึ่ง เป็นโครงสร้างทางเคมีที่ง่ายต่อการรีดิวซ์และการซัลไฟด์เป็นโลหะกัมมันต์ในรูปโลหะประจุศูนย์ (zero valence metals) และโลหะซัลไฟด์ตามลำดับ
- วัฏภาคออกไซด์รองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดที่มีเสถียรภาพแปรตามอุณหภูมิ (metastable phase) ต้องใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นจึงจะเกิดโครงสร้างโลหะออกไซด์ที่ต้องการ
- การเผากระตุ้นจะเกิดการควบแน่นของพันธะภายในตะกอนโลหะ หรือการรวมตัวกันของ อนุภาคขนาดเล็กให้มากขึ้นทำให้ได้ผลึกหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้กับโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นทำให้โลหะยึดจับบนพื้นผิวของตัวรองรับด้วยพันธะที่แข็งแรงขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาองค์ประกอบและโครงสร้างของซีโอไลต์

2.10.2 การรีดักชัน

การรีดักชัน (reduction) เป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการเปลี่ยนรูปโลหะออกไซด์หรือเกลือก่อนนำไปใช้โลหะกัมมันต์ในตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็นโลหะที่มีสถานะออกซิเดชันตามต้องการ โดยโลหะหลายชนิดแสดงสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาได้เมื่อมีสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ในปฏิกิริยา $\text{CuO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu}^0 + \text{H}_2\text{O}$

กระบวนการรีดักชันเป็นการให้ความร้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของแก๊สรีดิวซ์ เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สสังเคราะห์ ฟอรัลดีไฮด์ (formaldehyde) หรือ

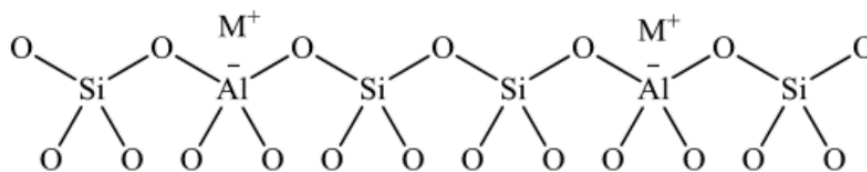
ไฮดราซีน (hydrazine) โดยไฮโดรเจนเป็นตัวเล็ก อันดับแรก ๆ เนื่องจากความเป็นพิษต่ำกว่าและหาซื้อได้ง่ายแก๊สรีดิวซ์อื่นๆ โดยแก๊สดังกล่าวต้องมี ความบริสุทธิ์สูงหากมี ออกซิเจน แก๊สซัลเฟอร์ ความชื้น และไฮโดรคาร์บอนเจือปนอยู่ต้องนำไป ผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ก่อนซึ่งใช้หลักการ การดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น โมเลกุลาร์ ซีฟใช้สำหรับการดูดซับความชื้น การกำจัด แก๊สซัลเฟอร์ใช้การดักจับด้วย ZnO เป็นต้น ซึ่งการ เลือกใช้คุณสมบัติขึ้นกับชนิดและปริมาณของ โลหะ

2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ มีสมบัติที่เหมาะสมหลายประการ ซีโอไลต์สามารถพบได้ทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ซึ่งซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะสามารถควบคุมขนาดและโครงสร้างที่ต้องการได้ โดยอาศัยการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ (ศิริสุข ลอยหา, 2556) ปัจจัยหลักที่ซีโอไลต์มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเคมี คือ การเป็นวัสดุที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง (Mohammadparast et al., 2015)

1. องค์ประกอบและโครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ เป็นสารอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ซึ่งมีโครงสร้างแบบสามมิติ เกิดจากซิลิเกต ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) และ อลูมิเนต ($[\text{AlO}_4]^{4-}$) มาเชื่อมต่อกันโดยผ่านมุมของออกซิเจน ทั้ง 4 อะตอม เพื่อจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ (อาทิตย์ อัครวสุชี, 2560) และมีสูตรทั่วไป ของโครงสร้าง คือ $M_{y/n}(\text{AlO}_2)_n(\text{SiO}_2)_m$ เมื่อ n คือประจุของไอออนบวก M_{y+y} คือ จำนวนหน่วย เตตระฮีดรอลต่อหน่วยเซลล์ y/x คืออัตราส่วน Si/Al แปรผันได้จาก 1 ถึง ∞



M^+ = Charge balancing cations

ภาพประกอบ 5 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์

(ที่มา: อาทิตย์ อัครวสุชี, 2560)

2. สมบัติของซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีคุณสมบัติเป็นเตตระไฮดรอล มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นได้ จึงสามารถนำมาปรับใช้งานได้หลากหลาย เช่น สามารถแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อทำให้เกิดเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซีโอไลต์ มีโครงสร้างซึ่งเป็นรูพรุนขนาดเล็กทำให้เกิดการดูดซับได้ดี นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวมากจึงเหมาะกับการนำมาเป็นวัสดุรองรับสำหรับ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน (ขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์) ทำให้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือมีความจำเพาะต่อรูปร่างโมเลกุลสูงโดยสามารถเลือกสารตั้งต้นและมีขนาดเหมาะสมเข้าไปทปฏิกิริยา จากสมบัติดังกล่าว ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3. ประโยชน์ของซีโอไลต์ ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์และบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้าน ดังนี้

1) ใช้เป็นสารดูดซับ (adsorbent) ในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี

2) ใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการแตก สลายโครงสร้างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นอย่างดี

3) ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เช่น แยกสารไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope) จากกากของเสีย กำจัดแอมโมเนียในน้ำทิ้ง กำจัดสารโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว เหล็ก ปรอท แมงกานีส ใช้เป็น detergent builder เป็นต้นเนื่องจากซีโอไลต์มีหลายชนิด และมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อน เพื่อให้สามารถ ใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด (สุนี ลาวัญยากุล, 2556)

2.11.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์/ซีโอไลต์

ปริมาณร้อยละโลหะคอปเปอร์ที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ จากวิธีการเคลือบแบบฝังเปียก (wet impregnation) และทำการกระตุ้นด้วยกระบวนการรีดักชันในการเปลี่ยนรูปโลหะออกไซด์ ให้เป็นโลหะที่มีความบริสุทธิ์ ก่อนนำไปใช้ในปฏิกิริยา โดยโลหะคอปเปอร์มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในการดูดซับออกซิเจนและดึงไฮโดรเจนออกจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ รวมถึงเปลี่ยนโครงสร้างความเป็นกรด เหมาะแก่การนำไปใช้ในการปรับสภาพของน้ำมันชีวภาพให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น

2.12 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

โดโลไมต์ (นพิตา วิทยชิวระนันท์, 2556) เป็นแร่แมกนีเซียมหรืออีกชื่อหนึ่งเรียกว่า แคลเซียมแมกนีเซียม คาร์บอเนต มีสูตรโมเลกุล คือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ หรือ $(\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3)$ การใช้โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการได้รับความสนใจมากซึ่งโดโลไมต์ จัดเป็นหินคาร์บอเนต โดยรูปทั่วไปของโดโลไมต์จะยังไม่สามารถนำไปใช้เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาได้เลย จึงต้องผ่านกระบวนการเผา ก่อนเพื่อให้รูปของแคลเซียม แมกนีเซียมคาร์บอเนตโดยทั่วไปโดโลไมต์มีองค์ประกอบหลักที่แตกตัวจากการเผาแล้วที่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 30%, แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 21%, คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 45% และมีองค์ประกอบ อื่น ๆ อีกเพียงเล็กน้อย เช่น SiO_2 , Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ปะปนอยู่

1. สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์

โดโลไมต์จะมีลักษณะทางกายภาพ เป็นผงมีสีขาว ผิวมันแววมืดเหมือนแก้ว ทึบแสง ความแข็ง ประมาณ 3.5 ถึง 4 ความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.82 ถึง 2.95 และ ความพรุนอยู่ที่ 8.6 และมีสมบัติทางเคมี คือ สามารถเกิดการทำปฏิกิริยาในกรดเกลือที่เจือจางได้ดี



ภาพประกอบ 6 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

โดยเราสามารถพบแร่โดโลไมต์ได้ทั่วไปในหลายจังหวัดของประเทศไทย ในภาคต่างๆ เช่น ภาคเหนือ พบที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน จังหวัดเชียงราย จังหวัดแพร่ จังหวัดลำพูน จังหวัดน่าน และจังหวัดอุดรดิตถ์ เป็นต้น ในภาคกลาง พบที่จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสระบุรี และจังหวัดลพบุรี เป็นต้น ในภาคตะวันตก พบที่จังหวัดชลบุรี จังหวัดจันทบุรี จังหวัดระยอง และจังหวัดปราจีนบุรี เป็นต้น และในภาคใต้ พบที่จังหวัด จังหวัดสงขลา จังหวัดพัทลุง และจังหวัดตรัง เป็นต้น

2. ประโยชน์ของโดโลไมต์

• ใช้เป็นหินคลุกได้ สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ใช้สำหรับสร้างคอนกรีต หรือปูนซีเมนต์ที่ทนต่อการซัดสี แต่จะต้องมีไม่มีสารจำพวกดินดานผสมอยู่ ด้วย เพราะจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย

- ใช้เป็นสารที่เชื่อในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เพื่อเป็นตัวดึงซิลิกาแมงกานีส
- ใช้ปรับค่าความเป็นกรดเบสของดินหรือแก้ดินเปรี้ยวได้
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น ซีโดไรต์เทียม เกลือแมกนีเซียม • ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นสารเสริมวัสดุทนความร้อน

2.12.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/โดโลไมต์

ศึกษาปริมาณร้อยละโลหะเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ จากวิธีการเคลือบแบบฝังเปียก (wet impregnation) และทำการกระตุ้นด้วยกระบวนการรีดักชันในการเปลี่ยนรูปโลหะออกไซด์ หรือเกลือโลหะกัมมันต์ในตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็นโลหะที่มีสถานะออกซิเดชันตามต้องการ ก่อนนำไปใช้ในการไพโรไลซิส โดยโลหะหลายชนิดแสดงสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาได้เมื่อมีสถานะออกซิเดชัน (oxidation state)

2.13 การศึกษาอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกัน

การหาอิทธิพลเสริมกันหรือหักล้างกัน (synergistic study) ของสารป้อน (feedstock) 2 ชนิด ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ หรือการหาอิทธิพลเสริมกันหรือหักล้างกัน การเทียบกันระหว่างค่าจริงที่ได้จากการทดลองของสองสารป้อนต่อผลิตภัณฑ์กับค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎี ซึ่งหาได้จากสมการ (Ba et al., 2023)

$$y = (x_1 W_1 + x_2 W_2)$$

เมื่อ	y	คือ	ค่าทางทฤษฎี
	x_1	คือ	สัดส่วนของสารตั้งต้นชนิดที่ 1
	x_2	คือ	สัดส่วนของสารตั้งต้นชนิดที่ 2
	W_1	คือ	น้ำหนักของสารตั้งต้นชนิดที่ 1
	W_2	คือ	น้ำหนักของสารตั้งต้นชนิดที่ 2

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ahmad (2022) ศึกษาคุณลักษณะของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากขานอ้อย *Saccharum barberi* เพื่อนำไปใช้เป็นน้ำชีวภาพ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์จำพวก ZSM ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส/นาที่ ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งและความร้อนของ *Saccharum barberi* พบว่าเซลลูโลสมีปฏิกิริยาให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตบสนองได้มากกว่าลิกนิน โดยพบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 251 องศาเซลเซียส ถึง 390 องศาเซลเซียส ให้น้ำมันชีวภาพที่เป็นปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจนในสัดส่วนที่สูง และค่อนข้างพบปริมาณของกำมะถันและไนโตรเจนในปริมาณน้อยมาก

(Kumar et al., 2022) ศึกษาการไพโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ใบและยอดขานอ้อยและทำให้เป็นผงชีวมวล โดยความสูงของชีวมวล 4-16 เซนติเมตร ขนาดอนุภาค 0.180-0.710 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน 15-30 องศาเซลเซียส/นาที่ และอุณหภูมิ 350-650 องศาเซลเซียส โดยสภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส ความสูงของชีวมวล 16 เซนติเมตร ขนาดอนุภาค 0.18-0.3 มม. อัตราการให้ความร้อน 25 องศาเซลเซียส/นาที่ ได้ผลิตภัณฑ์สูงสุดของน้ำมันชีวภาพ 44.7% ก๊าซชีวภาพ 36.67% และถ่านชีวภาพ 36.82%

(Hematkhah et al., 2023) ศึกษาน้ำมันชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทดแทน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไพโรไลซิสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 เซนติเมตร สูง 23 เซนติเมตร เมตร ความจุ 1 ลิตร และเครื่องปฏิกรณ์รีฟอร์มเมอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และความจุ 0.45 ลิตร ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โดยอาศัยซีโอไลต์และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดคืออุณหภูมิ 468 องศาเซลเซียส อัตราการปล่อยก๊าซ เท่ากับ 0.31 และอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 14.4 องศาเซลเซียส การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มค่าความร้อนสูงและผลผลิต เท่ากับ 34.43 และสำหรับการไพโรไลซิสโดยตรงคือ 27.22 น้ำมันชีวภาพที่ได้จากสาหร่ายเกลียวทอง ไพโรไลซิสแสดงค่าความร้อนสูงสุด (HHV)

(Li et al., 2023) การทำให้เป็นของเหลวด้วยความร้อน (HTL) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสาหร่ายขนาดเล็กเปียกเป็นเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม น้ำมันไบโอดีบจาก HTL โดยตรงมีคุณภาพด้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยปกติแล้วการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรเจนชันจะใช้ในการอัพเกรด biocrude แต่จำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนที่มีต้นทุนสูงและมีแรงดันสูง ในการศึกษาครั้งนี้ biocrude ดิบจาก HTL ของสาหร่ายเกลียวทองได้รับการอัพเกรดผ่านการเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสโดยใช้

Fe-HZSM5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีไฮโดรเจน ผลผลิตของน้ำมันชีวภาพที่ได้รับการอัพเกรดอยู่ระหว่าง 75% ถึง 86% ด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนที่สูงขึ้น (HHV) ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และ HHV ของน้ำมันชีวภาพที่ได้รับการอัพเกรดคือ 78.89%, 10.51% และ 40.8MJ/Kg. ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ตามลำดับ องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้รับการอัพเกรดได้รับการปรับปรุงคุณภาพ พื้นที่พีคของสารประกอบที่มีไนโตรเจนลดลง 50% ในขณะที่พื้นที่พีคของไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพที่ได้รับการอัพเกรดพร้อมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสองเท่าของสิ่งนั้น ใน biocrude ดิบ ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงคงการมีฤทธิ์บางอย่างไว้หลังจาก 5 รอบ ปริมาณ HHV และไนโตรเจนของน้ำมันชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วอยู่ที่ 41.52MJ/Kg. และ 0.39% ตามลำดับ

Varma et al. (2019) การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาไพโรไลซิสของซีเลื่อยไม้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งแบตช์ และสำรวจอิทธิพลของพารามิเตอร์กระบวนการไพโรไลซิสที่มีต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์ สภาวะในกระบวนการไพโรไลซิส เช่น อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดอนุภาคของซีเลื่อยไม้แตกต่างกันที่ 350–650 องศาเซลเซียส, 10 และ 50 องศาเซลเซียส/นาที่, 50–200 มิลลิลิตรต่อนาที่ และอยู่ระหว่าง 0.25-1.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดอยู่ที่ 44.16 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการทำความร้อน 50 องศาเซลเซียส/นาที่ และอัตราการไหลของไนโตรเจน 100 มิลลิเมตร/นาที่สำหรับช่วงขนาดอนุภาค 0.6 - 1 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์ขั้นสูงสุด พูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR), แก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี (GC-MS) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (¹H NMR) ถูกนำมาใช้เพื่อระบุบุคลิกเฉพาะของน้ำมันชีวภาพ ช่วงจุดเดือดของไบโอออยล์อยู่ระหว่าง 63 ถึง 360 องศาเซลเซียส ถ่านชีวภาพและชีวมวลดั้งเดิมได้รับการวิเคราะห์โดยวิธีเคมีกายภาพ เทอร์โมกราวิเมตริก และวิธีการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนการปล่อยรังสีภาคสนาม (FESEM) และเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

Charusiri and Vitidsant (2017) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสของฟางอ้อย ในน้ำมันชีวภาพและสารโดยใช้โดโลไมต์ที่เผาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันชีวภาพ การทดลองได้ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ SS316 ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ สภาวะการเผาโดโลไมต์ที่แตกต่างกัน อุณหภูมิ (400-600 องศาเซลเซียส) อัตราการป้อนชีวมวล (0.3–1.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) อัตราการไหลของก๊าซ (80–200 ,มิลลิลิตร/นาที่) และขนาดเฉลี่ย (250–1,000 ไมโครเมตร) ผลการวิจัยพบว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร่งปฏิกิริยา ให้ผลผลิตของเหลว 36.15

% โดยน้ำหนัก ผลผลิตก๊าซ 52.09 % โดยน้ำหนัก และผลผลิตของแข็ง 11.76 % โดยน้ำหนัก เมื่อสภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนชีวมวล 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง, ก๊าซไนโตรเจน 80 มิลลิลิตร/นาที่ และขนาดชีวมวล 500 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยโดโลไมต์เผา 10% โดยน้ำหนัก โดโลไมต์ที่เผา มีอิทธิพลต่อส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพจากปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน และการแตกสลายของไอระเหย และส่งผลให้น้ำมันชีวภาพได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยมีปริมาณออกซิเจนต่ำ ค่าความร้อนรวมสูงขึ้น

(Rijo et al., 2021) ศึกษาไพโรไลซิสของ กากกาแฟและชาที่ใช้แล้วมีลักษณะเฉพาะโดยเทอร์โมกราวิเมตรีเพื่อกำหนดองค์ประกอบและประเมินจลนศาสตร์ของไพโรไลซิสของส่วนประกอบเทียมลิกโนเซลลูโลสแต่ละตัวและไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ กากขามีเซลลูโลสประมาณสองเท่าและมีพลังงานกระตุ้นไพโรไลซิสสูงกว่าตัวอย่างกากกาแฟ ที่ 673 K ได้น้ำมันชีวภาพ 42% กากชาผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวได้เพียง 18% เท่านั้น ซึ่งเข้ากันได้กับปริมาณเซลลูโลสที่สูงขึ้นและพลังงานกระตุ้นสำหรับไพโรไลซิสที่สูงขึ้น อัลคาไลน์คาร์บอนेटที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซหรือก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยมีการผลิตน้ำมันชีวภาพลดลง แต่มาพร้อมกับการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในส่วนที่ระเหยได้ของน้ำมันชีวภาพที่ผลิต

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุด ในกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาปฏิกิริยาสำหรับไพโรไลซิส และกากกาแฟ โดยใช้ ซีโอไลต์ และ โดโลไมต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์กรด-เบส บนเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และออกแบบการทดลองด้วยวิธี Univariate Experimental Design ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาที่ละปัจจัย โดยมีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ชีวมวล ได้แก่ ซี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับไพโรไลซิส และกากกาแฟ
2. แก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 (บริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด, ประเทศไทย)
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ จากบริษัท SIGMA-ALDRICH, ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาฯ, ประเทศไทย)
5. เฟอริกไนเตรต (Ferric nitrate, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท CARLO ERBA Reagents SAS BP, ประเทศอิตาลี
6. คอปเปอร์ไนเตรต (Copper nitrate, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH, ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. อะซิโตนเกรดการค้า จากบริษัท เอเซียแปซิฟิค ฟิโตรเคมีคัล จำกัด
8. อะซิโตนเกรดวิเคราะห์ (CH_3COCH_3) จากบริษัท Merck จำกัด

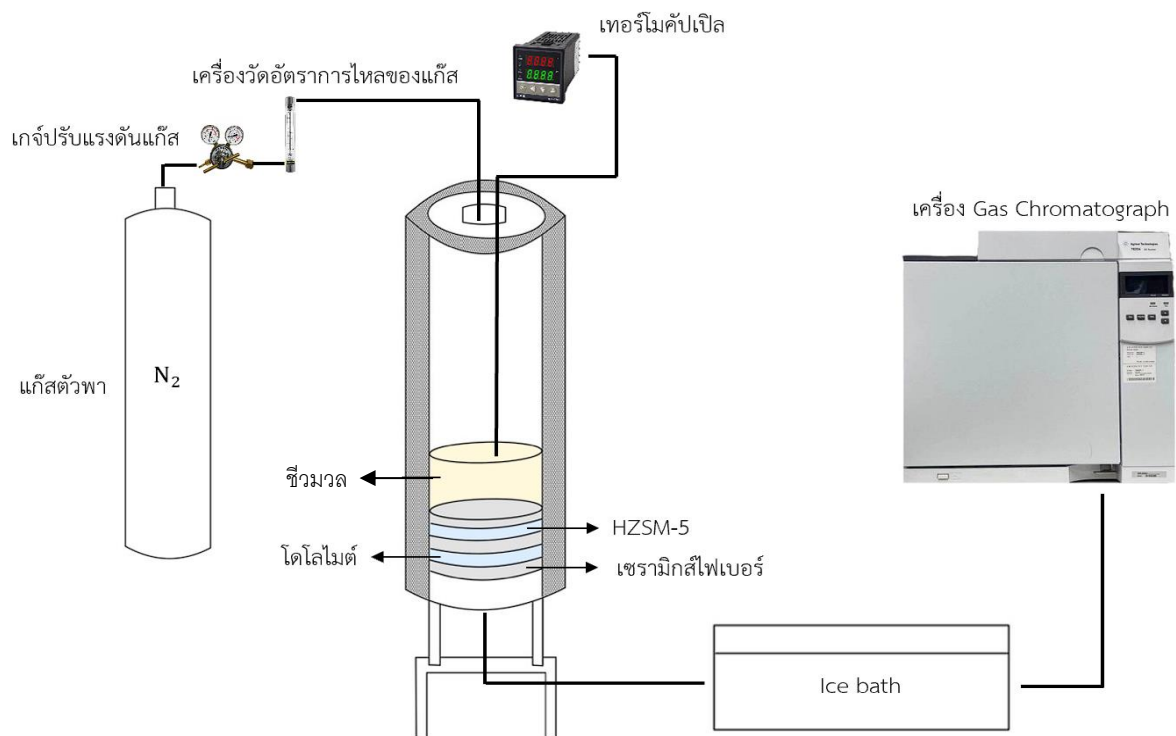
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ทำหน้าที่ในการแตกสลายเชิงความร้อนและเกิดการแตกตัวของสารระเหยไปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊ส ของเหลว และของแข็งภายในเตาเผาแบบท่อทำจากเหล็กกล้าเหนียว SS304 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 นิ้ว ความยาว 120 เซนติเมตร ซึ่งเป็นเตาเผาอุณหภูมิสูงและมีชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล สำหรับควบคุมอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิของเตาเผา
2. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม ยี่ห้อ BINDER รุ่น FD 115
3. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ML-SERIES

4. เครื่องบดย่อย Cutting Mill (HSIANGTAI MACHINERY INDUSTRY CO, ประเทศไทยไต้หวัน)

5. เครื่องกวนสาร ยี่ห้อ JOANLAB รุ่น MHS4Pro (Joan Lab Equipment Co., Ltd. ประเทศจีน)



ภาพประกอบ 7 ภาพฝั่งแสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องวัดความชื้น (Moisture Analyzer) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น HX204 ใช้สำหรับวิเคราะห์ความชื้นของชีวมวล



ภาพประกอบ 8 เครื่องมือวัดความชื้น

2. วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN628) โดยทำการเตรียมน้ำมันชีวภาพ 0.5 กรัม นำไปใส่ Tin foil หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN628)



ภาพประกอบ 9 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

3. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC-2010 Plus และเครื่องแมสสเปคโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS-QP2020 คอลัมน์ชนิด Capillary column ยี่ห้อ J&W Scientific รุ่น DB-HT-SIMDIS ขนาด 5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.530 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมัน โดยทำการเตรียมน้ำมันชีวภาพ นำไปละลายด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ หลังจากนั้นบรรจุลงโวลูม ขนาด 1.5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการฉีดเข้าเครื่อง GC ก่อนจะเข้าสู่ส่วนเครื่อง MS



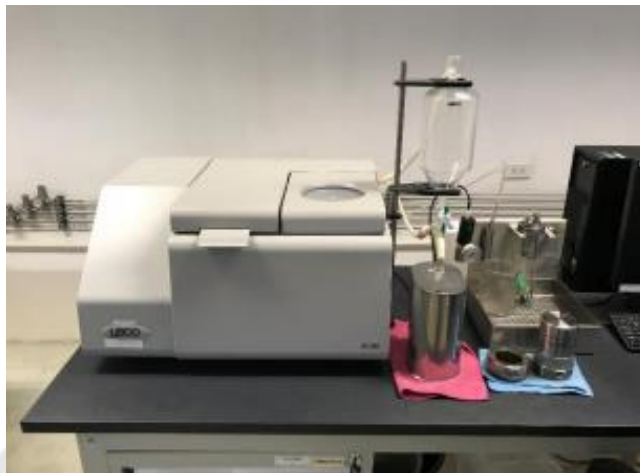
ภาพประกอบ 10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์

4. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET) ใช้สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

5. เครื่องวัดค่าความร้อน (Bomb calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC500) ใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์



ภาพประกอบ 12 เครื่องวัดค่าความร้อน

6. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) ยี่ห้อ PerkinElmer Scientific รุ่น Spectrum Teo FT-IR Spectrometer ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของน้ำมันชีวภาพ



ภาพประกอบ 13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

7. เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อยืนยันลักษณะประเภทของ
ตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 14 เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างชีวมวล

1. นำชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ที่รวบรวมมาได้ทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยการใช้เครื่องตัดแบบโรตารีความเร็วสูง หลังจากนั้นกรองด้วยตะแกรงขนาด 0.25-0.45 มิลลิเมตร

2. จากนั้นนำชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส กากกาแฟ และสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่ผ่านการกรองแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่มิดชิดโดยมีซิลิกาเจลอยู่ เพื่อใช้สำหรับการทดลองต่อไป

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีของชี้เลี้ยงจากชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ

1. เตรียมชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ที่ผ่านการบด อบแห้ง และผ่านการกรองแล้ว มาทำการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาคาร์บอนคงตัว สารที่ระเหยได้ ความชื้น และเถ้า และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

2. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์ความชื้น ทำได้โดยการนำชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ที่ผ่านการเตรียมไว้แล้วจากข้อที่ 1 นำมาใส่ในภาควัดความชื้น โดยวิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่อง Moisture analyzer และทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นฐานแห้ง (Dry basis)

- การวิเคราะห์สารที่ระเหยได้
- การวิเคราะห์เถ้า
- การวิเคราะห์คาร์บอนคงตัว

3. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) นำชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ที่ผ่านการเตรียมไว้แล้วจากข้อที่ 1 ใส่ลงในฟอยล์อลูมิเนียม ให้มีขนาดพอดีกับหลุมวิเคราะห์ตัวอย่าง จากนั้นใส่ฟอยล์อลูมิเนียมลงในหลุมเพื่อทำการวิเคราะห์และวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN analyzer

3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZSM5 ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 ที่เคลือบฝังด้วยคอปเปอร์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของความเป็นกรดและความว่องไวของการมีโลหะทองแดงเป็นพื้นที่ก่อกัมมันต์บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ทำได้โดยการเตรียมคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ในปริมาณร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ โดยตัวอย่างการเตรียม ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 ที่จะเคลือบฝังด้วย คอปเปอร์ไนเตรต ไตรไฮเดรต ร้อยละ 5 สามารถเตรียมได้ดังนี้

น้ำหนักของซีโอไลต์ที่จะเตรียม 10 กรัม น้ำหนักโมเลกุลของ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 241.6016 กรัมต่อโมล น้ำหนักโมเลกุลของทองแดง เท่ากับ 63.5460 กรัมต่อโมล ดังนั้นการเตรียม 5%Cu-ZSM5 10 กรัม สามารถหาปริมาณคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต ที่ต้องใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา จาก 100 กรัม ซีโอไลต์ มี ทองแดง 5 กรัม

10 กรัม ซีโอไลต์ มีทองแดง 0.5 กรัม หรือ $0.5 \text{ g} / 63.5460 \text{ g mol}^{-1}$

ดังนั้นต้องชั่ง $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ $7.868 \times 10^{-3} \text{ mol}$ หรือ

$$7.868 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 241.6016 \text{ g mol}^{-1} = 1.900 \text{ g}$$

ละลายคอปเปอร์ไนเตรต ไตรไฮเดรตตามปริมาณที่กำหนด ในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 80 มิลลิลิตร และเติมซีโอไลต์ HZSM-5 น้ำหนัก 10 กรัม ผสมให้เข้ากันโดยการกวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมควบคุมอุณหภูมิ ที่อัตราการกวน 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปอบในตู้อบลมร้อนระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสข้ามคืน จากนั้นนำไปแคลไซน์ในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ 550 องศาเซลเซียส ในอัตราการให้ความร้อน 1.10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จากนั้นแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำซีโอไลต์ที่เคลือบฝังด้วยโลหะทองแดงไปอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก แล้วนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-Dolomite ด้วยวิธีการเคลือบผงแบบเปียก

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ ใช้วิธีการเคลือบผงแบบเปียก เช่นเดียวกับการเตรียม การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZSM5 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของความเป็นกรดและความว่องไวของการมีโลหะเหล็กเป็นพื้นที่ก่อกัมมันต์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ทำได้โดยการเตรียมเฟอร์ริกไนเตรตโนนาไฮเดรต $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในปริมาณร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนักของตัวรองรับโดโลไมต์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย โดยตัวอย่างการเตรียม ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่จะเคลือบผงด้วย เฟอร์ริกไนเตรต โนนไฮเดรต ร้อยละ 5 สามารถเตรียมได้ดังนี้

น้ำหนักของโดโลไมต์ที่จะเตรียม 10 กรัม น้ำหนักโมเลกุลของ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 403.997 กรัมต่อโมล น้ำหนักโมเลกุลของเหล็ก เท่ากับ 55.845 กรัมต่อโมล ดังนั้นการเตรียม 5%Fe-dolomite 10 กรัม สามารถหาปริมาณเฟอร์ริกไนเตรต โนนไฮเดรต ที่ต้องใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา จาก 100 กรัม โดโลไมต์ มี เหล็ก 5 กรัม

$$10 \text{ กรัม โดโลไมต์ มีเหล็ก } 0.5 \text{ กรัม หรือ } 0.5 \text{ g} / 55.845 \text{ g mol}^{-1}$$

$$\text{ดังนั้นต้องชั่ง } \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} \text{ เท่ากับ } 8.953 \times 10^{-3} \text{ mol หรือ}$$

$$8.953 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 403.997 \text{ g mol}^{-1} = 3.617 \text{ g}$$

ละลายเฟอร์ริกไนเตรต โนนไฮเดรต ตามปริมาณที่กำหนด ในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 80 มิลลิลิตร และเติมโดโลไมต์ น้ำหนัก 10 กรัม ผสมให้เข้ากันโดยการกวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมควบคุมอุณหภูมิ ที่อัตราการกวน 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปอบในตู้อบลมร้อนระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสข้ามคืน จากนั้นนำไปแคลไซน์ในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ 650 องศาเซลเซียส ในอัตราการให้ความร้อน 1.05 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จากนั้นแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำโดโลไมต์ที่เคลือบผงด้วยโลหะเหล็กไปอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก แล้วนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh

3.3.4 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Univariate Experimental Design ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาที่ละปัจจัย โดยมีตัวแปรดังต่อไปนี้

1. ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาสภาวะการดำเนินการที่ดีที่สุดในระบบวนการไฟโรไลซิสซึ่งเลื้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สหราชอาณาจักรไปรูลิน่า และกากกาแฟ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

1.1 ศึกษาอุณหภูมิที่ 500-600 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่ดีที่สุด โดยสภาวะที่ใช้ศึกษา คือ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาที่ 60 นาที

1.2 ศึกษาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 25-75 มิลลิลิตรต่อนาที โดยสภาวะที่ใช้ศึกษา คือ อุณหภูมิที่ดีที่สุดจากการศึกษาข้อ 1.1 และเวลาที่ 60 นาที

1.3 ศึกษาเวลาที่ 45-75 นาที โดยสภาวะที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ดีที่สุดจากการศึกษาข้อที่ 1.1 และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ดีที่สุดจากการศึกษาข้อที่ 1.2

1.4 ศึกษาร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3-10 โดยน้ำหนัก โดยสภาวะที่ใช้ศึกษา คือ อุณหภูมิที่ดีที่สุดจากการศึกษาข้อ 1.1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ดีที่สุดจากการศึกษาข้อที่ 1.2 และเวลาที่ที่ดีที่สุดจากข้อ 1.3

2. ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZSM5 และ Fe-Dolomite ที่ร้อยละ 3-10 โดยน้ำหนัก

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักอนุภาคของสารตั้งต้นขนาด 0.25-0.45 มิลลิเมตร น้ำหนัก 10 กรัม จากนั้นบรรจุลงในท่อซีมวอลปิดจุกนำไปบรรจุในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ทำการไล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจน หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZSM5 และ Fe-Dolomite ตามสภาวะดำเนินการที่กำหนด

2. ใส่เซรามิกซีไฟเบอร์ลงในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อกันสารตัวอย่างไม่ให้วิ่งไปในส่วนควบแน่นไอระเหย สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจะบรรจุลงในก้านสแตนเลส โดยมีเซรามิกซีไฟเบอร์รองรับไม่ให้ผสมกับสารตัวอย่าง

3. ทำการติดตั้งส่วนเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ โดยนำท่อซีมวอลกับท่อปฏิกรณ์ หลังจากนั้นใส่เข้าไปในเตาเผา (Tube Furnace) หลังจากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของแก๊ส

ไนโตรเจนหรือแก๊สตัวพาตามสภาวะดำเนินการที่กำหนด ต่อสายของแก๊สไนโตรเจนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อไล่แก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบของเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นต่อเข้ากับส่วนควบแน่นไอรระเหยที่ประกอบไปด้วยขวดรูปชมพู่ที่บรรจุอะซิโตนไว้จำนวน 3 ขวด และในขวดสุดท้ายบรรจุซิลิกาเจล เพื่อดูดความชื้น

4. ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำการตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนดและทำการเปิดเครื่องเตาเผา (Tube Furnace)

5. เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงภาวะที่ต้องการ ทำการเปิดวาล์วท่อซีมวล เพื่อให้สารตัวอย่างตกลงมาในเครื่องปฏิกรณ์ และเริ่มจับเวลาตามภาวะดำเนินการที่กำหนด

6. เมื่อครบเวลาทำปฏิกิริยา ในปรับอุณหภูมิเครื่องเตาเผาลงให้เป็นอุณหภูมิห้อง แล้วทิ้งให้เย็นโดยยังคงเปิดแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา

7. ทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ก่อนการทดลอง เมื่อเครื่องปฏิกิริยาเย็นลง ทำการเก็บของเหลวที่ได้จากส่วนควบแน่นไอรระเหยและชะสารที่ติดในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอะซิโตนลงปิกเกอร์

8. นำของเหลวที่ชะนำมากรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 40 หลังจากนั้นนำไประเหยอะซิโตน ก่อนนำไปใส่ขวดเก็บน้ำมัน หลังจากนั้นนำไประเหยต่อบนเครื่องทำความร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และนำไปชั่งน้ำหนัก

9. นำกระดาษกรองที่ผ่านการชะมาอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

10. ทำการคำนวณร้อยละผลได้ (yield) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากระบวนการไพโรไลซิสและนำไปวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ ของเหลว และแก๊ส แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว (\%Liquid yield)} = \frac{W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว}}}{W_{\text{ซีมวล}}} \times 100$$

$$\text{- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์แข็ง (\%Solid yield)} = \frac{W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}}}{W_{\text{ซีมวล}}} \times 100$$

$$\text{- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊ส (\%Gas yield)} = 100 - (W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว}} - W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}})$$

$$\text{เมื่อ } W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว}} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลอง (กรัม)}$$

$$W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทดลอง (กรัม)}$$

$$W_{\text{ซีมวล}} = \text{น้ำหนักของซีมวลที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)}$$

บทที่ 4

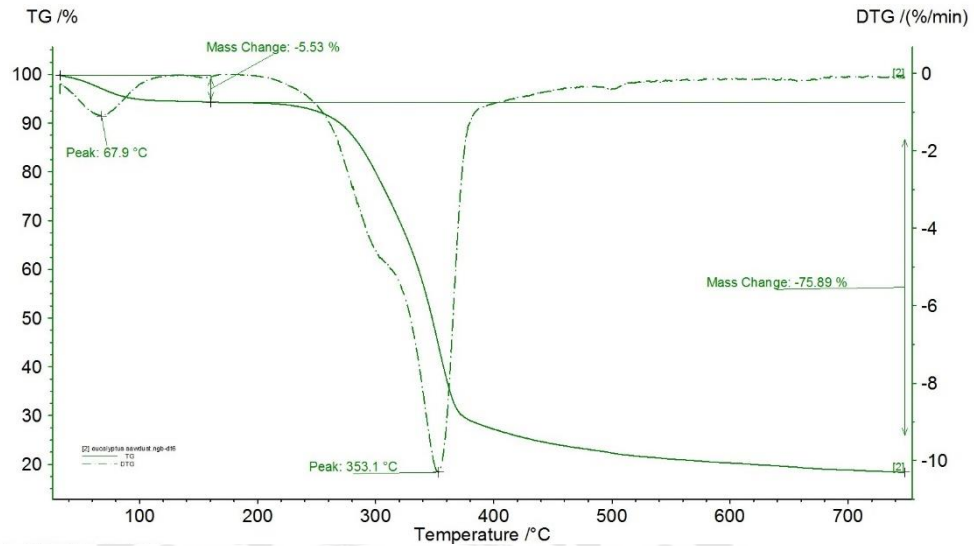
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ผสมประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบชั้นตอนเดียว ที่มีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและเวลา นอกจากนี้ได้มีการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด คือ ซีโอไลต์ (H-ZSM5) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท เบส คือ โดโลไมท์ (Dolomite) ตลอดจนพิกัดของแก๊สหลักของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

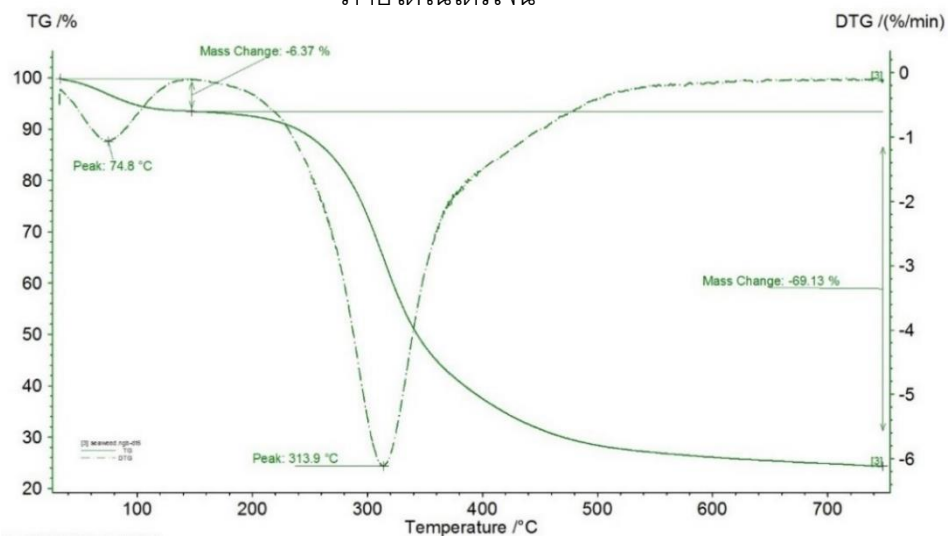
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีเบื้องต้นของซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสไปรูลิน่า และกากกาแฟ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีเบื้องต้นของซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสไปรูลิน่า และกากกาแฟ วิเคราะห์ผ่านเทคนิค การวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และวิธีการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

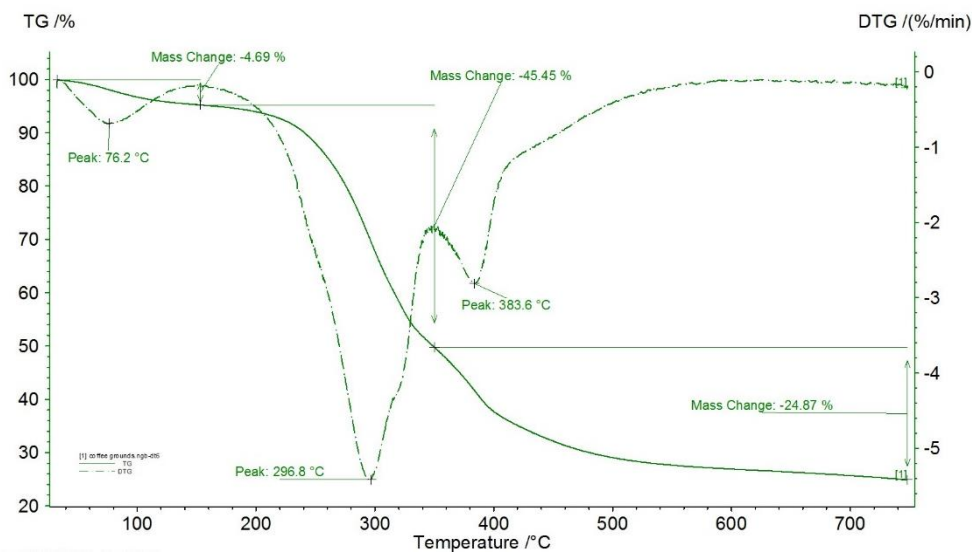
4.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายไฟรูปลาน้ำ และกากกาแฟ ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก



ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสีย น้ำหนัก (DTG) ของซีลี้อยจากยูคาลิปตัสในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้นิโตรเจน



ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสีย น้ำหนัก (DTG) ของสายไฟรูปลาน้ำในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้นิโตรเจน



ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของกากกาแฟในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ไนโตรเจน

จากภาพประกอบที่ 15-17 แสดงการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยูคาลิปตัส สหราชอาณาจักรไปรูลิน่า และกากกาแฟด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA/DTG) ในสภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจนถึง 750 องศาเซลเซียสที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน โดยพบว่าช่วงการสลายตัวของ ซีลี้อยูคาลิปตัส อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 67.9-353.1 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 67.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 353.1 องศาเซลเซียส ให้สารระเหยซึ่งเกิดจากการสลายตัวเชิงความร้อนของ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน

สหราชอาณาจักรไปรูลิน่า อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 74.8-313.9 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 74.8 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 313.9 องศาเซลเซียส

กากกาแฟ พบว่าในช่วงแรกมีการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลที่อุณหภูมิ 76.2 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก โดยน้ำหนัก 4.69 % ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของความชื้นหรือน้ำ โดยที่อุณหภูมิ 296.8 องศาเซลเซียส ให้สารระเหยซึ่งเกิดจากการสลายตัวเชิงความร้อนและอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 383.6 องศา

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุของชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายไปรูลีน่า และกากกาแฟ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาสมบัติทางกายภาพของชีวมวล ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และชี้เถ้า โดยทำการวิเคราะห์แบบประมาณตามวิธี (ASTM D3302-D7582) และและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาองค์ประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และซัลเฟอร์ (S) โดยทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุตามวิธี (ASTM D 4239-D5373) ของสายไปรูลีน่า กากกาแฟ และชี้เลี้ยงยูคาลิปตัส และสามารถหาค่าความร้อนสูง (High heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Low heating value, LVH) โดยคำนวณจากสมการที่ 4-1 และ 4-2

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \frac{33.82 \times C + 1442.8 \times \left(H - \frac{O}{8} \right)}{1000} \quad (4-1)$$

$$\text{LHV (MJ/kg)} = \text{HHV} - (0.218 \times H) \quad (4-2)$$

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของซีลี้อยูคาลิปตัสสำหรับสายโปรลูน่า และกากกาแฟ

การวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก*			
	ซีลี้อยูคาลิปตัส	สำหรับสายโปรลูน่า	กากกาแฟ	วิธีการ
แบบประมาณ				
ความชื้น	9.13	7.64	5.24	
สารระเหย	72.37	74.75	72.85	ASTM D7582
ซีลี้อั่ว	2.53	5.83	4.37	
คาร์บอนคงตัว	15.97	12.23	17.54	

การวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก*			
	ซีลี้อยูคาลิปตัส	สำหรับสายโปรลูน่า	กากกาแฟ	วิธีการ
แบบแยกธาตุ				
คาร์บอน (C)	47.50	50.73	44.51	
ไฮโดรเจน (H)	7.41	7.02	6.51	ASTM D5373
ไนโตรเจน (N)	10.90	2.71	0.28	
ซัลเฟอร์ (S)	0.71	0.12	0.02	ASTM D4239
ออกซิเจน (O)**	28.10	35.05	46.15	Calculation
H/C (โมล/โมล)	1.87	1.66	1.75	Calculation
O/C (โมล/โมล)	0.44	0.52	1.29	Calculation
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	21.69	20.96	16.12	Calculation
ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg)	20.07	19.43	14.70	Calculation
ค่าความร้อน (MJ/kg)	17.40	20.83	20.98	ASTM D5865

หมายเหตุ: *หลักอ้างอิงแบบเปียก (As received), **คำนวณด้วยวิธีผลต่าง (by different)

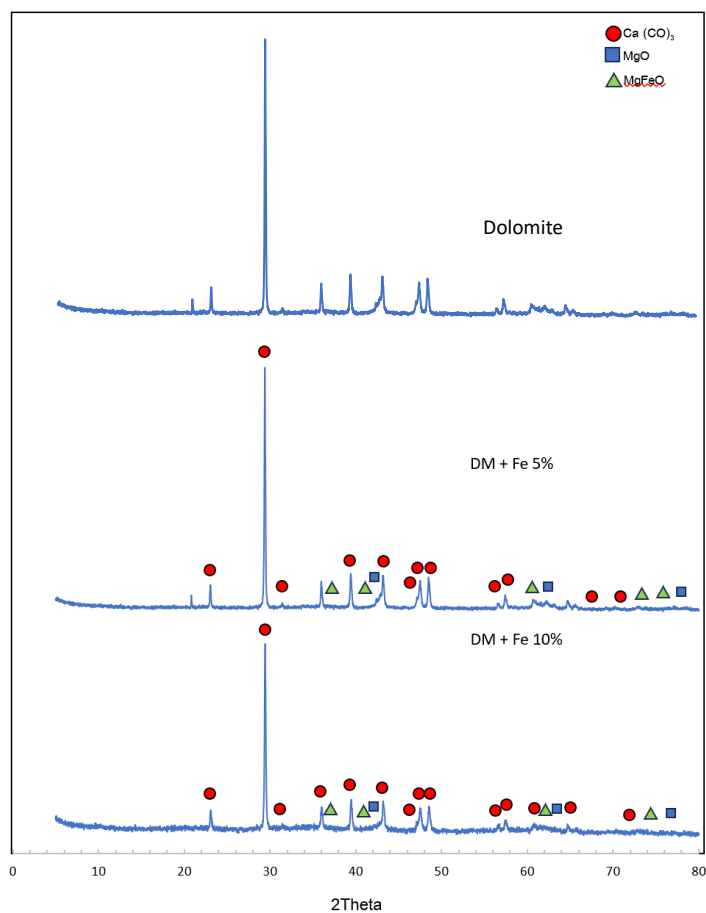
จากข้อมูล ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบต่างๆของซีลี้อยูคาลิปตัส สำหรับสายโปรลูน่า และกากกาแฟ เมื่อวิเคราะห์แบบประมาณพบว่าประกอบด้วย ความชื้น ร้อยละ 9.13, 7.64 และ

5.24 โดยน้ำหนักตามลำดับ สารระเหย ร้อยละ 72.37, 74.75 และ 72.85 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซี้้เถ้า ร้อยละ 2.53, 5.83 และ 4.37 โดยน้ำหนักตามลำดับ และคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 15.97, 12.23 และ 17.54 โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังตารางที่ 1 และเมื่อวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่า มีปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 44.51, 47.50 และ 50.73 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณไฮโดรเจน ร้อยละ 6.51, 7.41 และ 7.02 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจน ร้อยละ 0.28, 10.90 และ 2.71 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณซัลเฟอร์ ร้อยละ 0.02, 0.71 และ 0.12 โดยน้ำหนักตามลำดับ และปริมาณออกซิเจน ร้อยละ 46.15, 28.10 และ 35.05 โดยน้ำหนักตามลำดับ มีค่าความร้อน 17.40, 20.83 และ 20.98 MJ/kg ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูง (คำนวณจากสมการ 4-1) 16.12, 21.69 และ 20.96 MJ/kg ของซี้้เถ้าลอยยูคาลิปตัส สำหรับรายสไปรูลิน่า และกากกาแพ ตามลำดับ มีค่าความร้อนต่ำ (คำนวณจากสมการ 4-2) 14.70, 20.07 และ 19.43 MJ/kg ของซี้้เถ้าลอยยูคาลิปตัส สำหรับรายสไปรูลิน่า และกากกาแพ แสดงให้เห็นว่าในซี้้เถ้าลอยยูคาลิปตัส สำหรับรายสไปรูลิน่า และกากกาแพ ประกอบด้วย สารระเหย เป็นองค์ประกอบหลัก

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และซีโอไลต์ รวมไปถึงอิทธิพลของปริมาณ เหล็ก/โดโลไมต์ร้อยละ 1,5 และ 10 โดยน้ำหนักของโดโลไมต์ และคอปเปอร์/ซีโอไลต์ร้อยละ 1,5 และ 10 โดยน้ำหนักของซีโอไลต์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกวิเคราะห์ผ่านเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วย เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer, XRD) และเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ แลพเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)

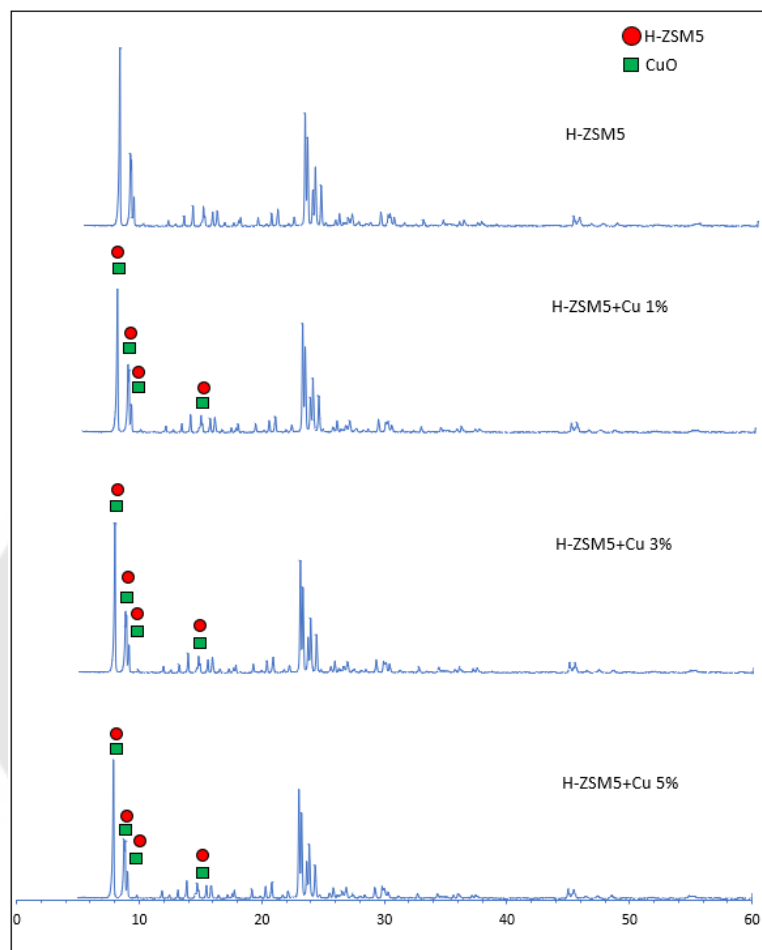
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อน-หลังแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง (Impregnation) เหล็กบนโดโลไมต์ และคอปเปอร์บนซีโอไลต์ด้วยเทคนิคเอกเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD)



ภาพประกอบ 18 XRD pattern ของ โดโลไมต์ และ เหล็ก/โดโลไมต์

จากภาพประกอบที่ 18 เป็นรูปการณณ์เดี่ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ โดโลไมต์และการเคลือบฝังแบบเปียกของ 5% และ 10% $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ บนโดโลไมต์ พบว่าแสดง โครงสร้างเมื่อทำการเคลือบฝังโลหะเหล็กบนของโดโลไมต์ แล้วทำให้โครงสร้างหลักที่ไม่แตกต่างจากการแคลไซน์โดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วย $\text{Ca}(\text{CO})_3$ และ MgO ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโดโลไมต์ และพบการพืดของ $\text{Mg}_x\text{Fe}_y\text{O}_z$ ที่ 2theta เท่ากับ 36.5° 42.5° 61.4° 73.4° 77.6° และพบพืด ของ Fe_2O_3 ที่ 2theta เท่ากับ 23.5° 31.4° 36.5° 42.5° 61.2° 74.4° และ 78.8° แสดงว่า วิธีการเคลือบฝัง 5% Fe

$(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ บนโดโลไมต์ ไม่ทำให้โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโดโลไมต์เปลี่ยนแปลงไป



ภาพประกอบ 19 XRD pattern ของ ซีโอไลต์ และ คอปเปอร์/ซีโอไลต์

จากภาพประกอบ 19 แสดงลักษณะ pattern ประเภท และชนิดของซีโอไลต์ พบว่า H-ZSM5 ที่เตรียมได้มี intensity Peak ลักษณะบ่งชี้เดียวกับ Na-Y zeolite และเมื่อทำการกระตุ้นด้วยโลหะบน H-ZSM5 ด้วยการเคลือบฝังแบบเปียกแล้ว พบว่า XRD pattern ของ x%Cu-HZSM-5 เมื่อ x คือ ร้อยละของโลหะที่ทำการเคลือบฝังไปบนเทมเพลตของ H-ZSM5 ให้ Intensity Peak ไม่แตกต่างกับ pattern H-ZSM5 แสดงให้เห็นว่าผลของการกระตุ้นด้วยโลหะคอปเปอร์ลงบน parent H-ZSM5 คอปเปอร์จะเกิดการแทนที่ตำแหน่งของโปรตอนบน parent H-ZSM5 ซีโอไลต์และไม่ทำให้โครงสร้าง และชนิดของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

4.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller (BET) และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ H-ZSM5 และ ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซีโอไลต์ (Cu/H-ZSM5) ในปริมาณของโลหะทองแดง เมื่อมีปริมาณของโลหะคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง สอดคล้องผลการวิเคราะห์ XRD สามารถอธิบายได้ว่า การเคลือบฝังโลหะออกไซด์ปริมาณเล็กน้อยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลักๆ แต่ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับ หรือ ซีโอไลต์ ลดลงเนื่องจากเกิดการอุดตันรูพรุนขนาดเล็กระดับไมโครพอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ และตัวรองรับอาจเกิดการสลายตัวของโครงสร้างเกิดการหลอมรวมตัวของโลหะออกไซด์ในขั้นตอนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง จึงมักพบว่า จะทำให้เกิดการอุดตันรูพรุนของตัวรองรับ

ในขณะที่การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/โคโลไมต์ (Fe/DM) ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียกในปริมาณของโลหะเหล็กที่แตกต่างกัน ให้ผลการทดลองเมื่อโหลดเฟอร์ริกไนเตรต โนนานไฮเดรต ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลง ขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นเล็กน้อย เกิดจากการโลหะออกไซด์ทำให้เพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ จะเห็นว่าพื้นที่ผิวของเมโซพอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อโหลดเฟอร์ริกไนเตรต โนนานไฮเดรต ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะให้ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/DM เป็นไปในทิศทางเดียวกันโดย ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับลดลงเนื่องจากเกิดการอุดตันรูพรุนขนาดกลางระดับเมโซพอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ และตัวรองรับอาจเกิดการสลายตัวของโครงสร้างเกิดการหลอมรวมตัวของโลหะออกไซด์ในขั้นตอนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง

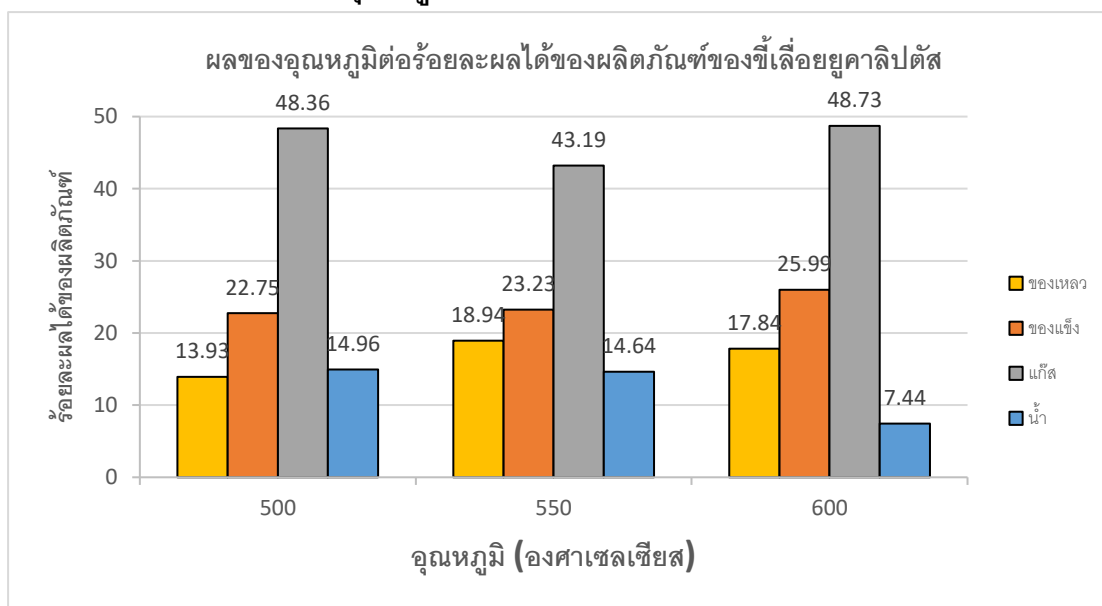
ตาราง 2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่เคลือบฝังตัว โลหะทองแดง ที่แตกต่างกัน และ ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่เคลือบฝังด้วยโลหะเหล็กที่แตกต่างกัน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
HZSM-5	333.2	0.255	5.9
1%Cu/HZSM-5	331.6	0.249	6.4
5%Cu/HZSM-5	318.2	0.244	6.9
10%Cu/HZSM-5	306.5	0.208	8.3
dolomite	14.87	0.087	99.4
1%Fe/dolomite	14.73	0.082	92.7
5%Fe/dolomite	13.77	0.074	86.3
10%Fe/dolomite	12.31	0.069	67.6

4.3 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของสาหร่ายสไปรูลิน่า กากกาแฟ และซีลี้อยูคาลิปตัส ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมประเภท กรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบขั้นตอนเดียว

4.3.1 ผลของของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของซีลี้อยูคาลิปตัส

4.3.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

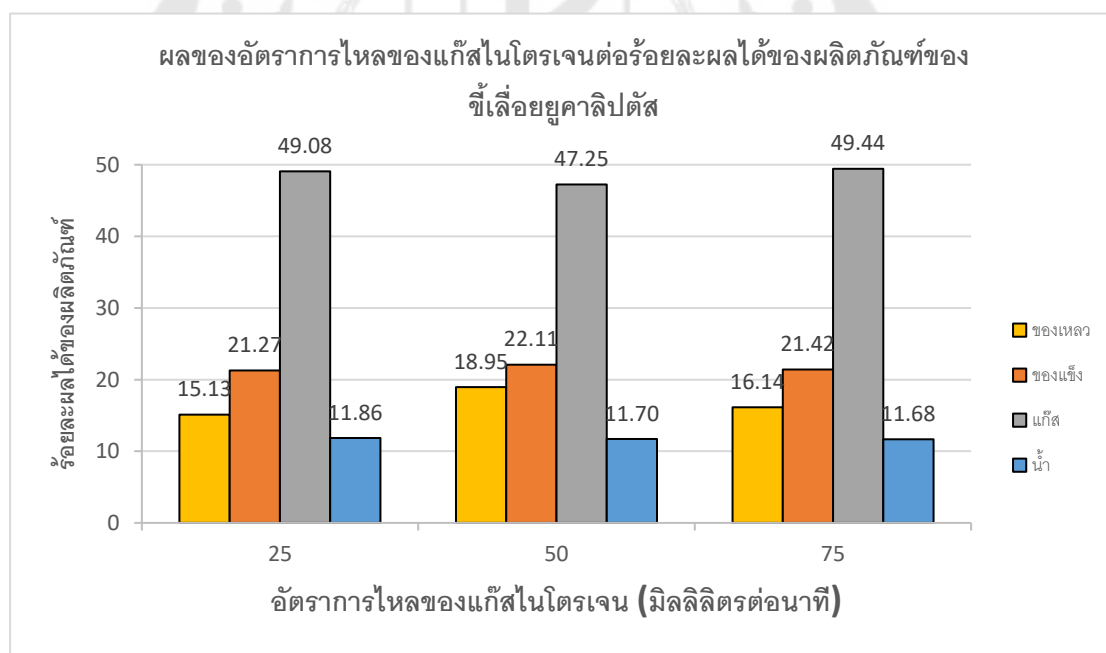


ภาพประกอบ 20 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของซีลี้อยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 20 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซีลี้อยูคาลิปตัส โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เมื่อภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 18.94 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 43.19 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อความร้อนสูงขึ้นการสลายเชิงความร้อนจะมากขึ้นอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการแพร่ความร้อน เข้าไปยังชีวมวลได้มากจึงเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ดี นั่นคือปฏิกิริยาเคมีความร้อน และเกิดเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกลับมา

เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 18.94 เป็น 17.84 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 48.73 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิสูงมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการสลายตัวเชิงความร้อนขององค์ประกอบภายในสารชีวมวลไปเป็นสารระเหยได้ และได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่ไม่ควบแน่น เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองของสารระเหยที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในช่วงแรกไปเป็นไอของสารระเหยและเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ซึ่งจะให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเบา หรือแก๊สที่ไม่ควบแน่นเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยช่วงอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส

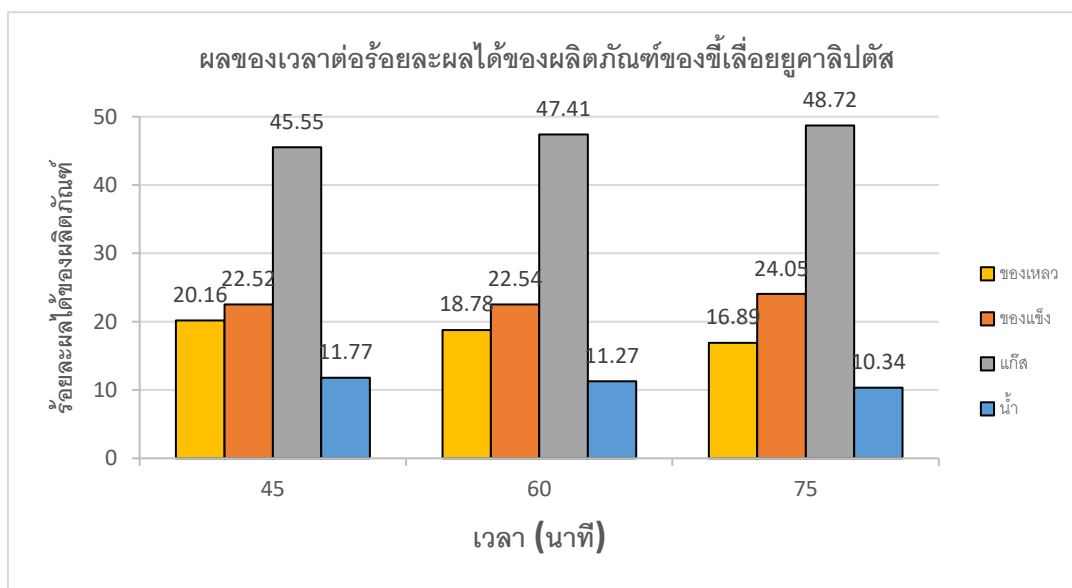
4.3.1.2 ผลของอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ชีลื้อยยูคาลิปตัส



ภาพประกอบ 21 ผลของอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของชีลื้อยยูคาลิปตัส เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 21 แสดงผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซีล้อยูคาลิปัส โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25-75 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุร้อยละ 18.95 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 47.25 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 75 มิลลิลิตรต่อนาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 18.95 เป็น 16.14 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 49.44 อธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนมากขึ้นปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวลดลง เนื่องจากแก๊ส ไนโตรเจนมีหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) ที่สามารถพาในสองทิศทางคือแพร่ความร้อนเข้า ไหลผ่านเนื้อสารหรือชีวมวล (Heat transfer) และพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางร้อน ของชีวมวล (Mass transfer) ไปยังไปยังชุดควบแน่นและควบแน่นกลับมาในรูปผลิตภัณฑ์เหลว เมื่อ เปรียบเทียบปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลว คาดได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นการพาความร้อนไหลผ่านชีวมวลเร็วเกินไปทำให้การสลายตัวเชิงความร้อนลดลง หรือเกิดการพาความร้อนที่ใช้สำหรับการสลายตัวออกไปด้วย อีกทั้งการพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่เร็วเกินไป ทำให้ชีวมวลที่ได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์และเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ สารระเหยจึงไม่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ดีพอส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าลดลง เมื่อแก๊สไนโตรเจนมีปริมาณที่มากขึ้นเกิดการพาความร้อนและแก๊สเร็วเกินไป เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จึงมีค่าโดยอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สช่วงที่ดีที่สุดที่ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.1.3 ผลของเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์



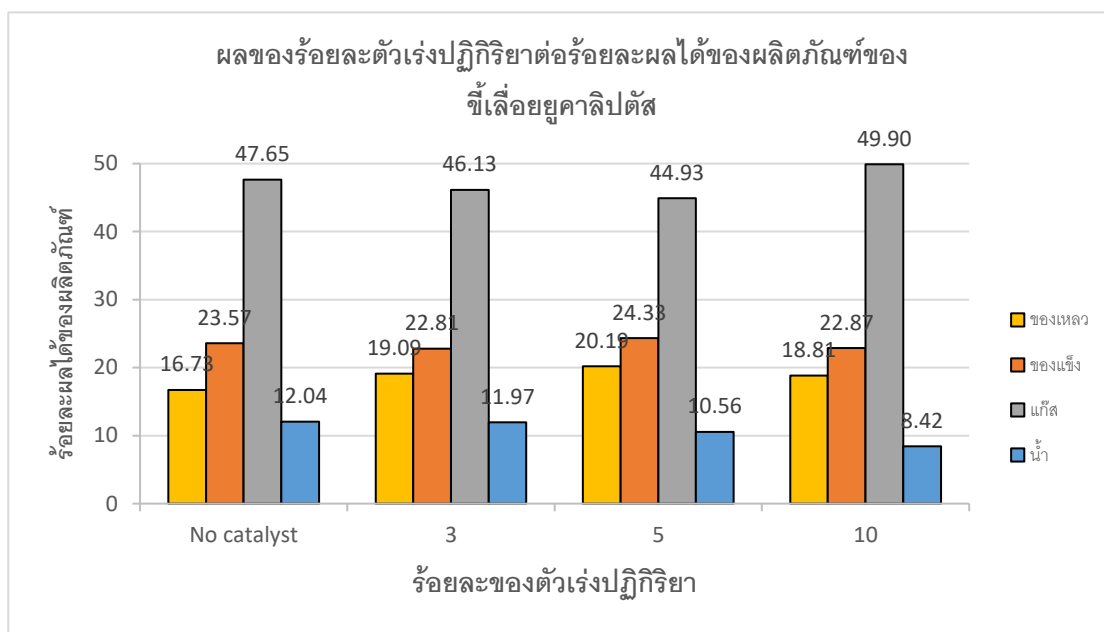
ภาพประกอบ 22 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของซีลีออยยูคาลิปตัส เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 22 แสดงผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซีลีออยยูคาลิปตัส โดยทำการทดลองที่เวลา 45-75 นาที เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่เวลา 45 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 20.16 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 45.55 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 และ 75 นาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 20.16 เป็น 18.78 และ 16.89 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 47.41 และ 48.72 โดยน้ำหนักตามลำดับ

เนื่องจากชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานยิ่งขึ้น จะทำให้เกิดการแพร่ความร้อนในชีวมวลมากขึ้นความร้อนที่แพร่เข้าไปภายในชีวมวลเกิดการสะสมมากขึ้น เวลานาน ๆ ส่งผลต่อการสลายตัวของสารเมื่อได้รับความร้อนที่มากตามไปด้วยและยังส่งผลถึงน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสทำให้ได้รับความร้อนสะสมระเหยกลายเป็นไอหรือแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถไม่ควบแน่นได้ ส่งผลต่อปริมาณแก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลามากขึ้นจะส่งผลต่อสองส่วนหลัก คือ ชีว

มวล และ น้ำมันชีวภาพ ที่ได้รับความร้อนสะสมทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้มากขึ้น โดยเวลาที่ดียที่สุดที่ได้อ้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 45 นาที

4.3.1.4 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

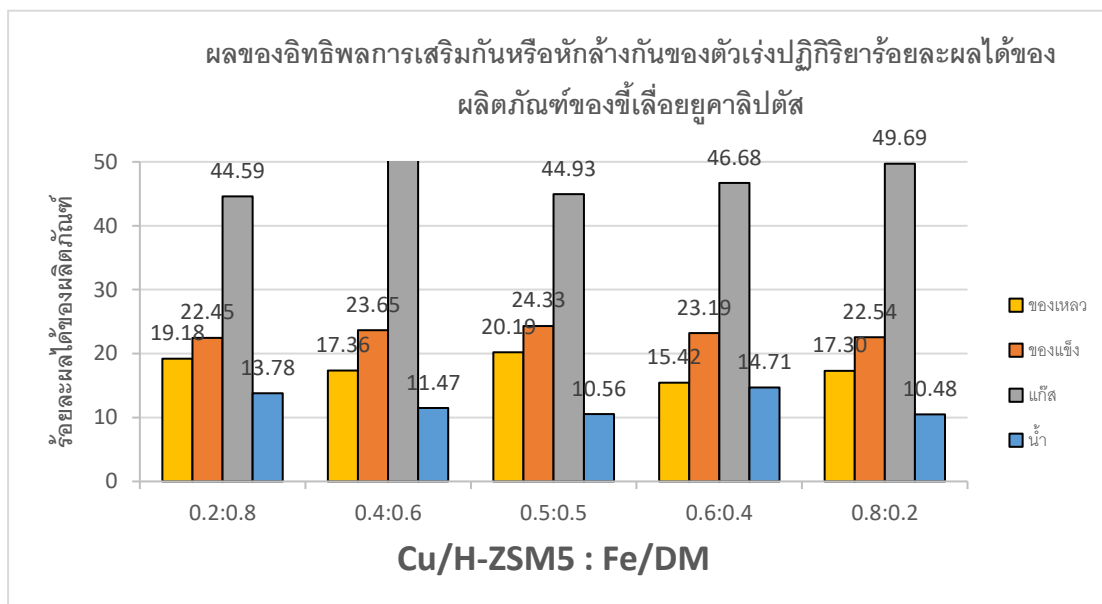


ภาพประกอบ 23 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของ ซีลีเนียมคาลิปตัล เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อ นาที และเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 23 แสดงผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากซีลีเนียมคาลิปตัล โดยทำการทดลองที่ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา 3-10 โดยน้ำหนัก เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 20.19 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ไม่ควมแน่นอนร้อยละ 44.93 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 20.19 เป็น 18.81 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ ปริมาณแก๊สที่ไม่ควมแน่นอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 49.90 โดยน้ำหนัก โดยเมื่อเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนัก

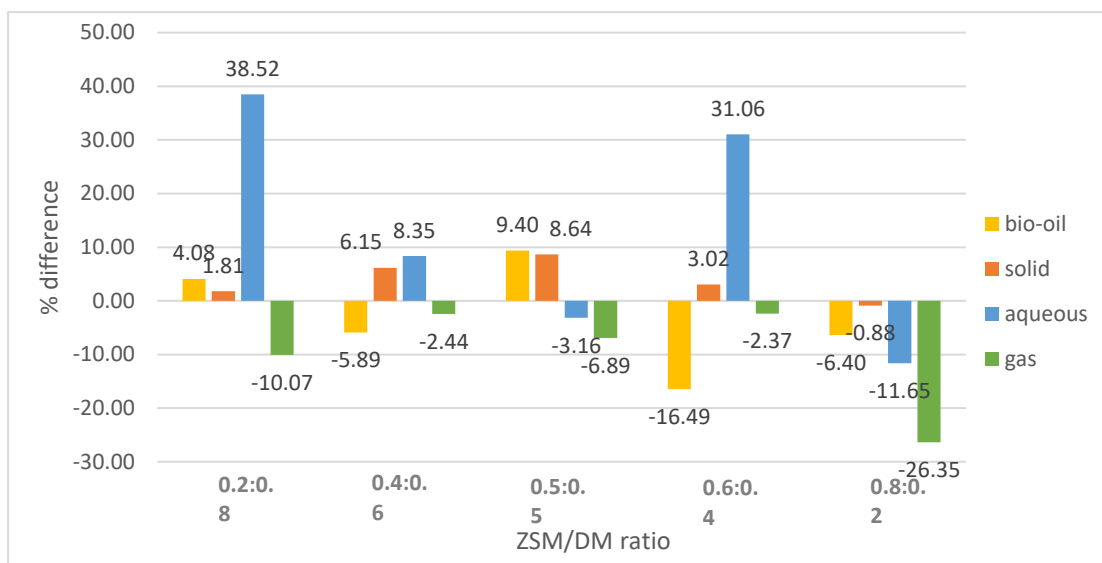
ของตัวเร่งปฏิกิริยามักทำให้มีบริเวณก่อกัมมันต์ซึ่งแสดงความเป็นกรดบรอนสเตทและสามารถเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนและช่วยส่งเสริมการแตกสลายของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนไปเป็นสารมัธยันตร์หรือช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน แต่ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 โดยน้ำหนักไปเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักส่งผลให้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพของซีเลอียูคาลิปตัส เพียงเล็กน้อย ให้ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพ ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 18.81 โดยน้ำหนัก โดยพออธิบายได้จากของการแตกสลายเชิงความร้อนขององค์ประกอบจากชีวมวลไปเป็นไอสารระเหยที่เป็นสารประกอบออกซิเจนเนทและไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการแพร่ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งบางส่วนเกิดปฏิกิริยาบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ตำแหน่งบีต้า เกิดปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน และเกิดการจัดโครงสร้างไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลงจนสามารถแพร่ผ่านผิวรูพรุนแล้วเกิดกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาโพลิโกเมอไรเซชัน และแอมมาติกเซชันทำให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเหมาะสมและถูกนำออกไปยังหน่วยควบแน่นไปเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงสภาพของพื้นที่ก่อกัมมันต์และลดการก่อกองคาบคาร์บอนหรือโค้กภายในผิว หรือกายรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยลง และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำหรือระยะเวลาในการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งได้ยาวนานขึ้น

4.3.1.5 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 24 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของซีลื้อยยูคาลิปตัส เมื่อสภาวะคงที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 24 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที พบว่าอัตราส่วน ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM 0.5 ต่อ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพสูงสุด ร้อยละ 20.19 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วน 0.6 ต่อ 0.4 ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพต่ำสุด ที่ร้อยละ 15.42 โดยน้ำหนัก แสดงว่า Fe/DM มีอิทธิพลการเสริมกันและหักล้างกับ Cu/H-ZSM5 ต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนจาก 0.6:0.4 ไปเป็น 0.4 ต่อ 0.6 และ 0.2 ต่อ 0.8 เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ Fe/DM น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.42 เป็น 17.36 และ 19.18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

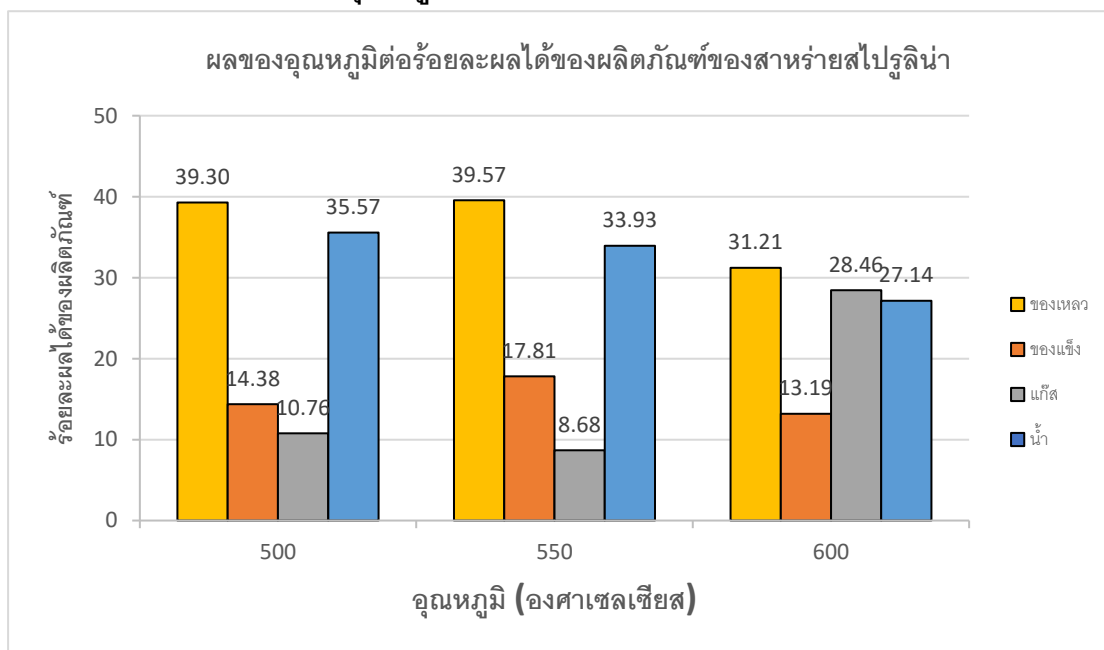


ภาพประกอบ 25 ผลการเสริมหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ของซีเลโอซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 25 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ในทุกอัตราส่วนให้ผลการเสริมกันในเชิงลบต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊ส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่กักน้ำมันส่งผลให้เป็นบริเวณที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องจากการแตกตัวเชิงความร้อนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน และส่งเสริมการแตกสลายขั้นทุติยภูมิหรือสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้ อัตราส่วนของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM 0.5 ต่อ 0.5 ให้ผลการส่งเสริมกันในเชิงบวกสูงสุดต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพร้อยละ 9.40

4.3.2 ผลของของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของสาหร่ายสไปรูลิน่า

4.3.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

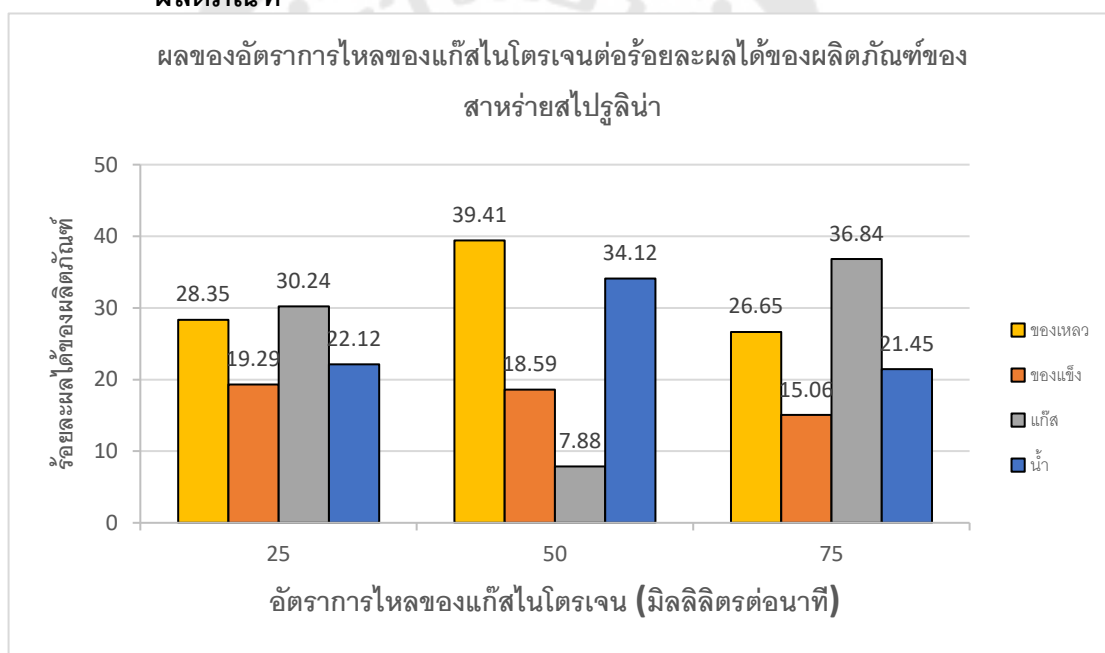


ภาพประกอบ 26 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของสาหร่ายสไปรูลิน่าที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 26 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เมื่อภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุทธร้อยละ 39.57 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 8.68 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อความร้อนสูงขึ้นการสลายเชิงความร้อนจะมากขึ้นอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการแพ้ความร้อน เข้าไปยังชีวมวลได้มากจึงเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ดี นั่นคือปฏิกิริยาเคมีความร้อน และเกิดเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์

น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 39.57 เป็น 31.21 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 28.46 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิสูงมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการสลายตัวเชิงความร้อนขององค์ประกอบภายในสารชีวมวลไปเป็นสารระเหยได้ และได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่ไม่ควบแน่น เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองของสารระเหยที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในช่วงแรกไปเป็นไอของสารระเหยและเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ซึ่งจะให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเบา หรือแก๊สที่ไม่ควบแน่นเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยช่วงอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ได้อ้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส

4.3.2.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

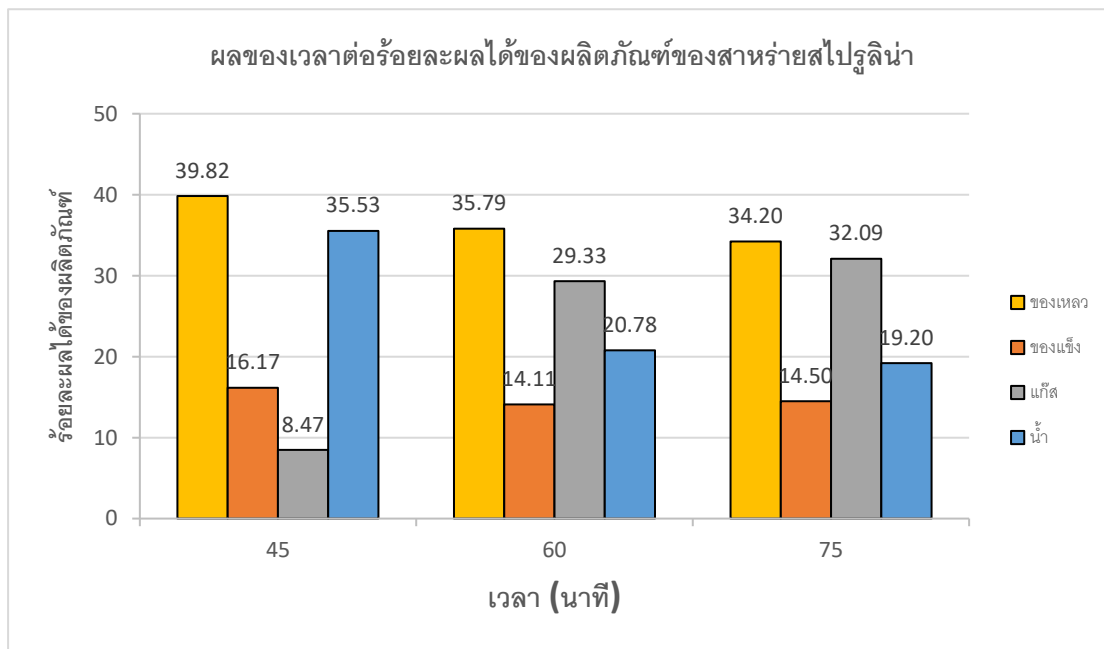


ภาพประกอบ 27 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของสารรายสไปรูลิน่า เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 27 แสดงผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสหารายสไปรูลิน่า โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25-75 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อภาวะคงที่ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 39.41 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 7.88 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 75 มิลลิลิตรต่อนาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 39.41 เป็น 26.65 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 36.84

อธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนมากขึ้นปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวลดลงเนื่องจากแก๊ส ไนโตรเจนมีหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา ที่สามารถพาในสองทิศทางคือแพร่ความร้อนเข้าไหลผ่านเนื้อสารหรือชีวมวล และพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางร้อน ของชีวมวล ไปยังไปยังชุดควบแน่นและควบแน่นกลับมาในรูปผลิตภัณฑ์เหลว เมื่อ เปรียบเทียบปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลว คาดได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นการพาความร้อนไหลผ่านชีวมวลเร็วเกินไปทำให้การสลายตัวเชิงความร้อนลดลง หรือเกิดการพาความร้อนที่ใช้สำหรับการสลายตัวออกไปด้วย อีกทั้งการพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่เร็วเกินไป ทำให้ชีวมวลที่ได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์และเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ สารระเหยจึงไม่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ดีส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าลดลง เมื่อแก๊สไนโตรเจนมีปริมาณที่มากขึ้นเกิดการพาความร้อนและแก๊สเร็วเกินไป เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จึงมีค่าลดลง โดยอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สช่วงที่ดีที่สุดที่ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.2.3 ผลของเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

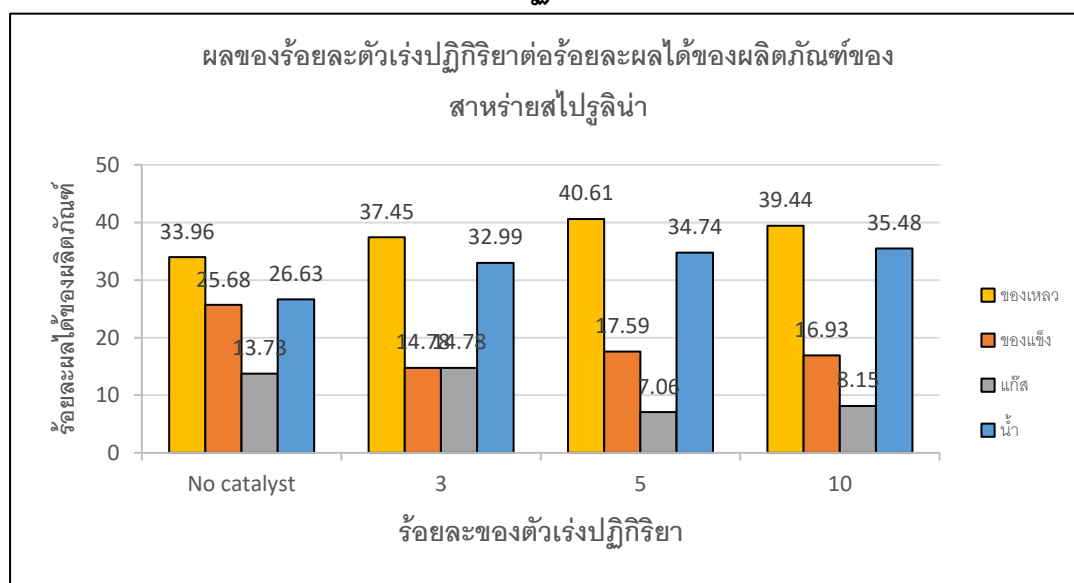


ภาพประกอบ 28 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 28 แสดงผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยทำการทดลองที่เวลา 45-75 นาที เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่เวลา 45 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 39.82 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 8.47 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 และ 75 นาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 39.82 เป็น 35.79 และ 34.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 29.33 และ 32.09 โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากชีวมวลที่อยู่ในภายในเครื่องปฏิกรณ์นานยิ่งขึ้น จะทำให้เกิดการแพร่ความร้อน (Heat transfer) ในชีวมวลมากขึ้น ความร้อนที่แพร่เข้าไปภายในชีวมวลเกิดการสะสมมากขึ้น เวลานาน ๆ ส่งผลต่อการสลายตัวของสารเมื่อได้รับความร้อนที่มากตามไปด้วยและยังส่งผลถึงน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส

ทำให้ได้รับความร้อนสะสมระเหยกลายเป็นไอหรือแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถไม่ควบแน่นได้ ส่งผลต่อปริมาณแก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลามากขึ้นจะส่งผลต่อสองส่วนหลัก คือ ชีวมวล และ น้ำมันชีวภาพ ที่ได้รับความร้อนสะสมทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้มากขึ้น โดยเวลาที่ดีที่สุดที่ได้อ้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 45 นาที

4.3.2.4 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

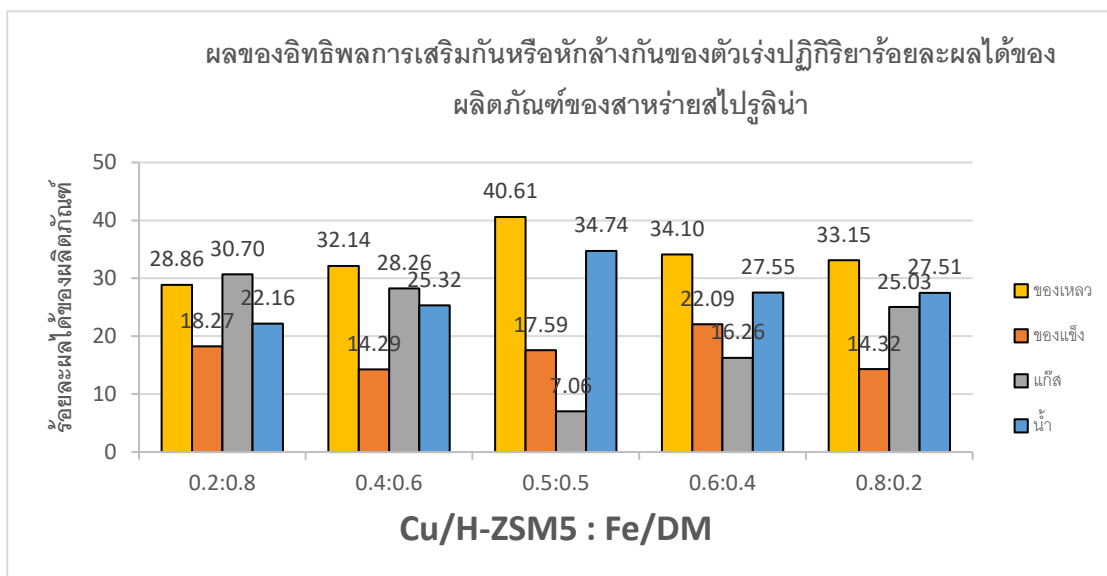


ภาพประกอบ 29 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของสายโปรลิน่า เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 29 แสดงผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสายโปรลิน่า โดยทำการทดลองที่ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา 3-10 โดยน้ำหนัก เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดร้อยละ 40.61 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 7.06 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 40.61 เป็น 39.44 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่

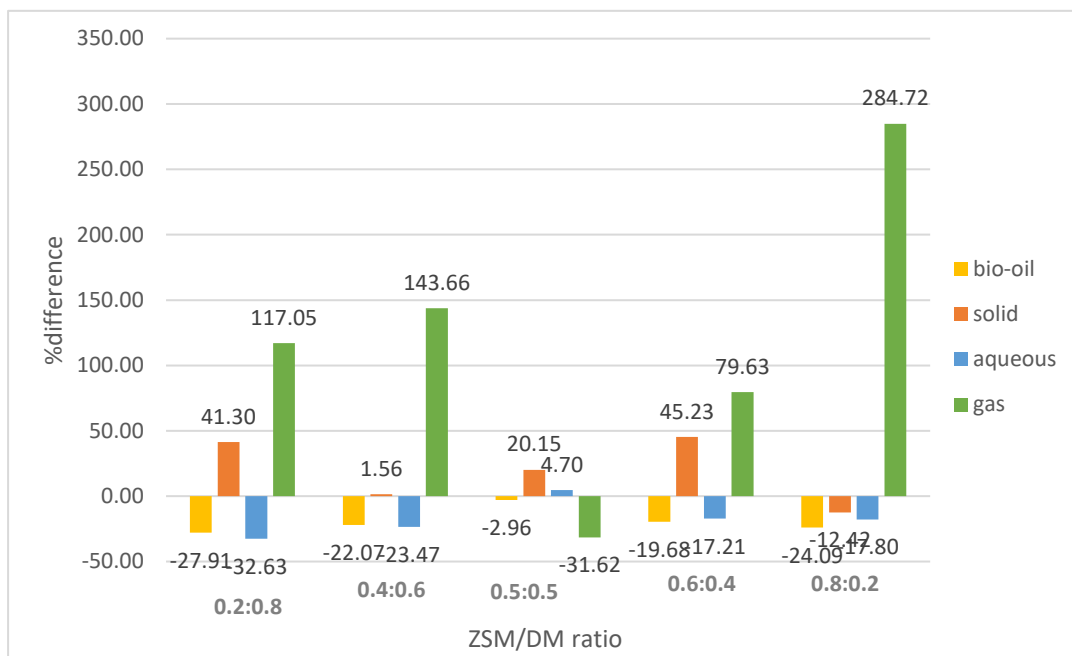
ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8.15 โดยน้ำหนัก โดยเมื่อเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามักทำให้มีบริเวณก่อกัมมันต์ซึ่งแสดงความเป็นกรดบรอนสเตทและสามารถเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนและช่วยส่งเสริมการแตกสลายของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนไปเป็นสารมัธยันตร์หรือช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน แต่ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 โดยน้ำหนักไปเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพของสาหร่ายสไปรูลิน่า เพียงเล็กน้อย ให้ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพ ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 39.44 โดยน้ำหนัก โดยพออธิบายได้จากการแตกสลายเชิงความร้อนขององค์ประกอบจากชีวมวลไปเป็นไอสารระเหยที่เป็นสารประกอบออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการแพร่ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งบางส่วนเกิดปฏิกิริยาบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ตำแหน่งบีต้า เกิดปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน และเกิดการจัดโครงสร้างไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลงจนสามารถแพร่ผ่านผิวรูพรุนแล้วเกิดกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาโพลิโกเมอไรเซชัน และแอมโรมาติกเซชันทำให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเหมาะสมและถูกนำออกไปยังหน่วยควบแน่นไปเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงสภาพของพื้นที่ก่อกัมมันต์และลดการก่อกองตัวของกากคาร์บอนหรือไค้กภายในผิว หรือกายรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยลง และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำหรือระยะเวลาในการไพโรไลซ์เชิงตัวเร่งได้ยาวนานขึ้น

4.3.2.5 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 30 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า เมื่อสภาวะคงที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 30 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที พบว่าอัตราส่วน ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM 0.5 ต่อ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพสูงสุด ร้อยละ 40.61 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วน 0.2 ต่อ 0.8 ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพต่ำสุด ที่ร้อยละ 28.86 โดยน้ำหนัก แสดงว่า Cu/H-ZSM5 มีอิทธิพลการเสริมกันและหักล้างกับ Fe/DM ต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนจาก 0.2 ต่อ 0.8 ไปเป็น 0.4 ต่อ 0.6 0.6 ต่อ 0.4 และ 0.8 ต่อ 0.2 เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ Cu/H-ZSM5 น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 28.86 เป็น 32.14, 34.10 และ 33.15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

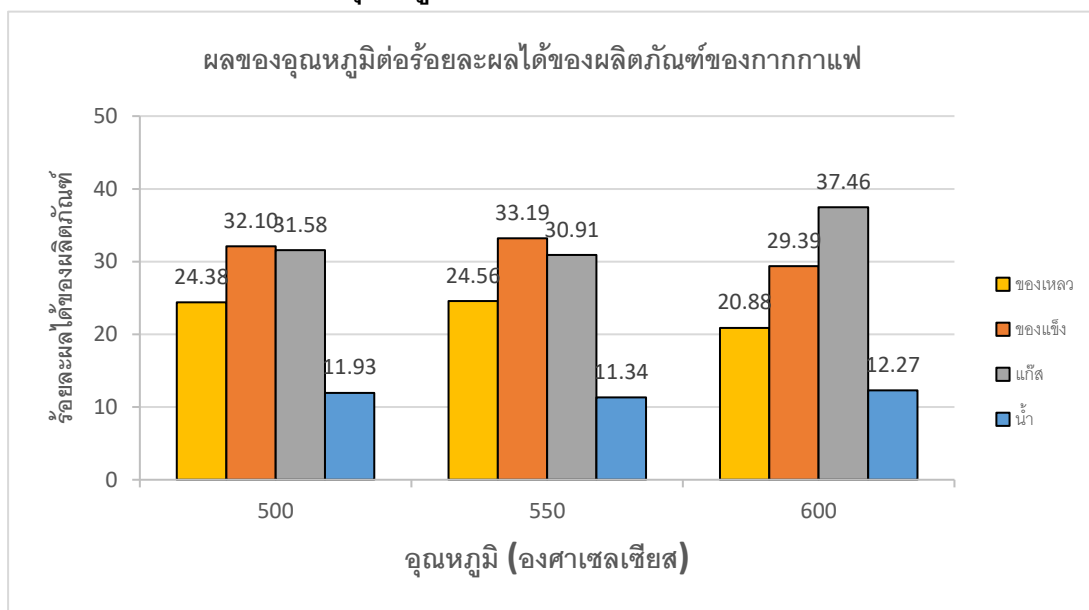


ภาพประกอบ 31 ผลการเสริมหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 31 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM 0.2 ต่อ 0.8 ถึง 0.5 ต่อ 0.5 และ 0.6 ต่อ 0.4 ถึง 0.8 ต่อ 0.2 ให้ผลการเสริมกันเชิงลบร้อยละ -27.91 ถึง -2.96 และร้อยละ 19.68 ถึง 24.09

4.3.3 ผลของของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของกากกาแฟ

4.3.3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

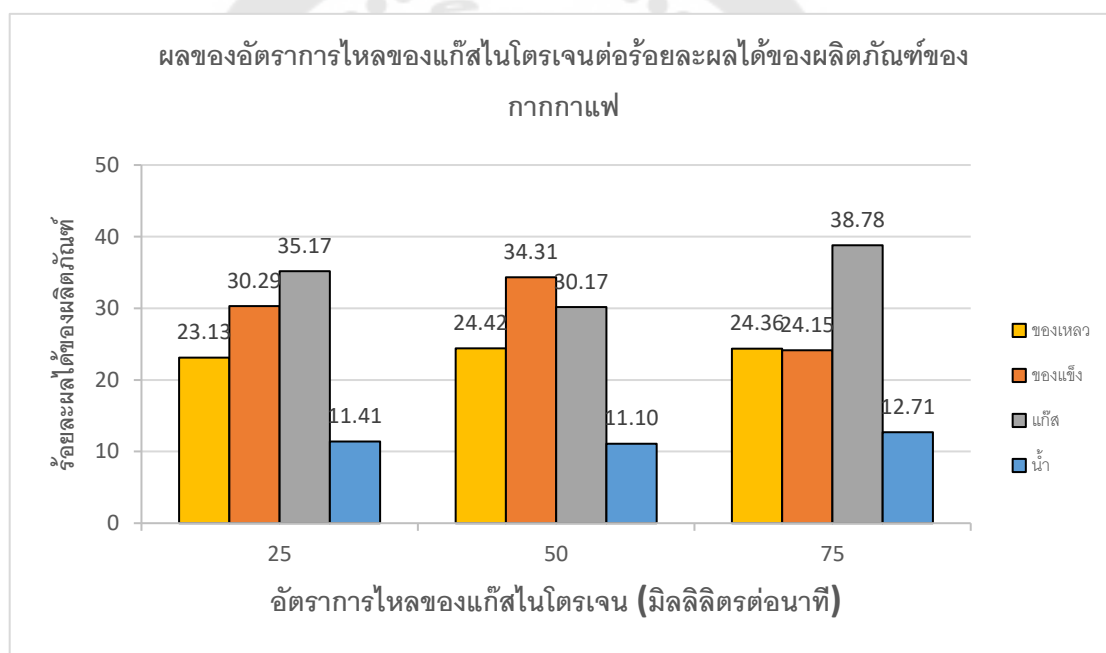


ภาพประกอบ 32 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของกากกาแฟที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 32 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากกาแฟ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เมื่อภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 24.56 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 30.91 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อความร้อนสูงขึ้นการสลายเชิงความร้อนจะมากขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการแพร่ความร้อน เข้าไปยังชีวมวลได้มากจึงเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ดี นั่นคือปฏิกิริยาเคมีความร้อน และเกิดเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 24.56 เป็น 20.88 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่น

เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 37.46 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิสูงมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการสลายตัวเชิงความร้อนขององค์ประกอบภายในสารชีวมวลไปเป็นสารระเหยได้ และได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่ไม่ควบแน่น เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองของสารระเหยที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในช่วงแรกไปเป็นไอของสารระเหยและเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งจะให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเบา หรือแก๊สที่ไม่ควบแน่นเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยช่วงอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส

4.3.3.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

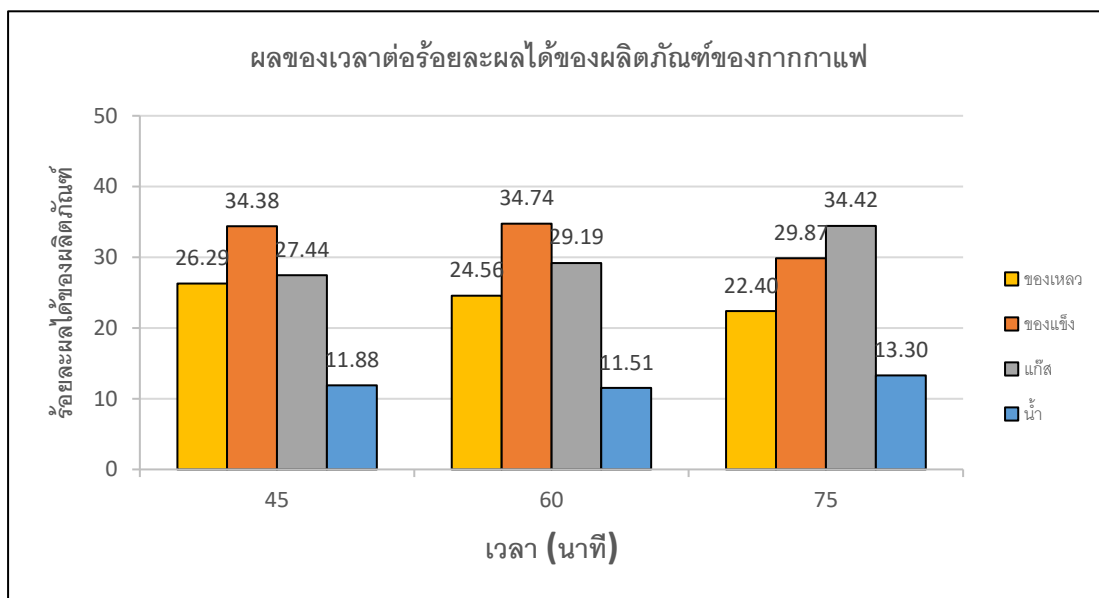


ภาพประกอบ 33 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของกากกาแฟ เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 33 แสดงผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากกาแฟ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25-75 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลิตภณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 24.42 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 30.17 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 75 มิลลิลิตรต่อนาที ผลิตภณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 24.42 เป็น 24.36 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 38.78 อธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนมากขึ้นปริมาณผลิตภณฑ์เหลวลดลงเนื่องจากแก๊ส ไนโตรเจนมีหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา ที่สามารถพาในสองทิศทางคือแพร่ความร้อนเข้าไหลผ่านเนื้อสารหรือชีวมวล และพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางร้อน ของชีวมวล ไปยังไปยังชุดควบแน่นและควบแน่นกลับมาในรูปผลิตภณฑ์เหลว เมื่อ เปรียบเทียบปริมาณร้อยละของผลิตภณฑ์เหลว คาดได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นการพาความร้อนไหลผ่านชีวมวลเร็วเกินไปทำให้การสลายตัวเชิงความร้อนลดลง หรือเกิดการพาความร้อนที่ใช้สำหรับการสลายตัวออกไปด้วย อีกทั้งการพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่เร็วเกินไป ทำให้ชีวมวลที่ได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์และเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ สารระเหยจึงไม่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ดีพอส่งผลให้ผลิตภณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าลดลง เมื่อแก๊สไนโตรเจนมีปริมาณที่มากขึ้นเกิดการพาความร้อนและแก๊สเร็วเกินไป เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ลดลง ส่งผลให้ผลิตภณฑ์เหลวที่ได้จึงมีค่าลดลง โดยอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สช่วงที่ดีที่สุดที่ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.3.3 ผลของเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

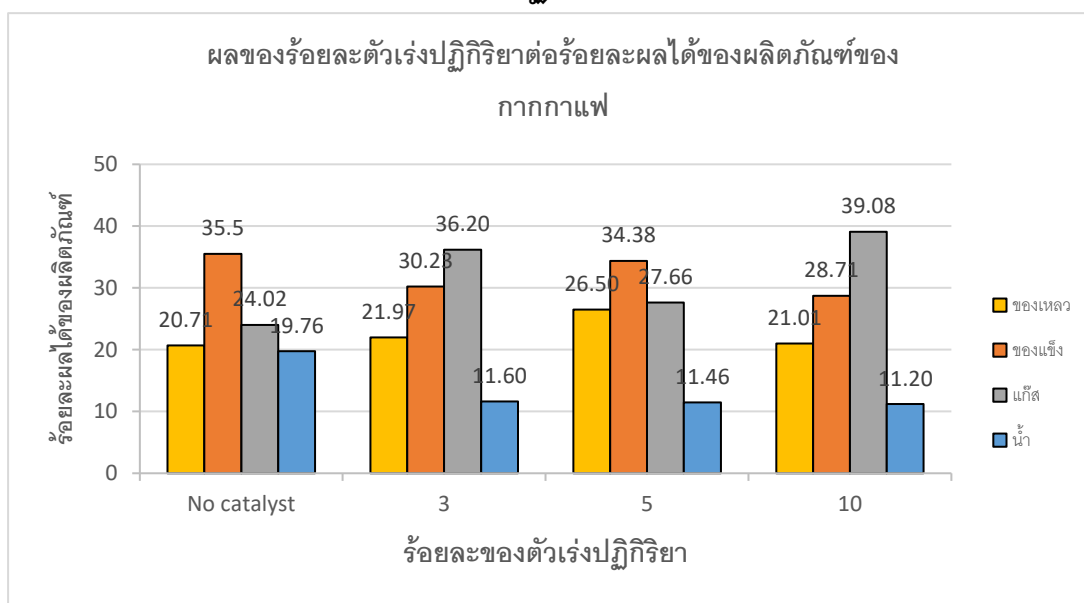


ภาพประกอบ 34 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของกากกาแฟ เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 34 แสดงผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากกาแฟ โดยทำการทดลองที่เวลา 45-75 นาที เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่เวลา 45 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 26.29 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 27.44 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 และ 75 นาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 26.29 เป็น 24.56 และ 22.40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 29.19 และ 34.42 โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากชีวมวลที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์นานยิ่งขึ้น จะทำให้เกิดการแพร่ความร้อน (Heat transfer) ในชีวมวลมากขึ้น ความร้อนที่แพร่เข้าไปภายในชีวมวลเกิดการสะสมมากขึ้น เวลานาน ๆ ส่งผลต่อการสลายตัวของสารเมื่อได้รับความร้อนที่มากตามไปด้วยและยังส่งผลถึงน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส ทำให้ได้รับความร้อนสะสมระเหยกลายเป็นไอน้ำหรือแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถไม่ควบแน่นได้ ส่งผลต่อปริมาณแก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลามากขึ้นจะส่งผลต่อสองส่วนหลัก คือ ชีวมวล และ น้ำมัน

ชีวภาพ ที่ได้รับความร้อนสะสมทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้มากขึ้น โดยเวลาที่ดียที่สุดที่ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ เวลาที่ 45 นาที

4.3.3.4 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

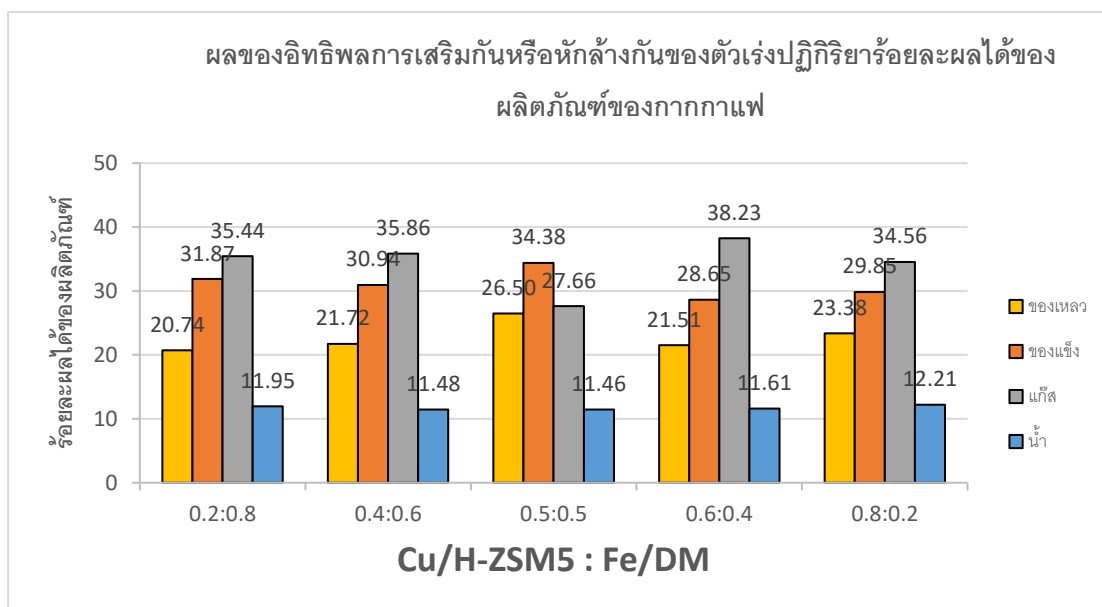


ภาพประกอบ 35 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของกากกาแฟ เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

จากภาพประกอบ 35 แสดงผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยทำการทดลองที่ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา 3-10 โดยน้ำหนัก เมื่อภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 พบว่าที่ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุทธร้อยละ 26.50 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไม่ควบแน่นร้อยละ 27.66 โดยน้ำหนักแต่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 26.50 เป็น 21.01 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 39.08 โดยน้ำหนัก โดยเมื่อเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนัก

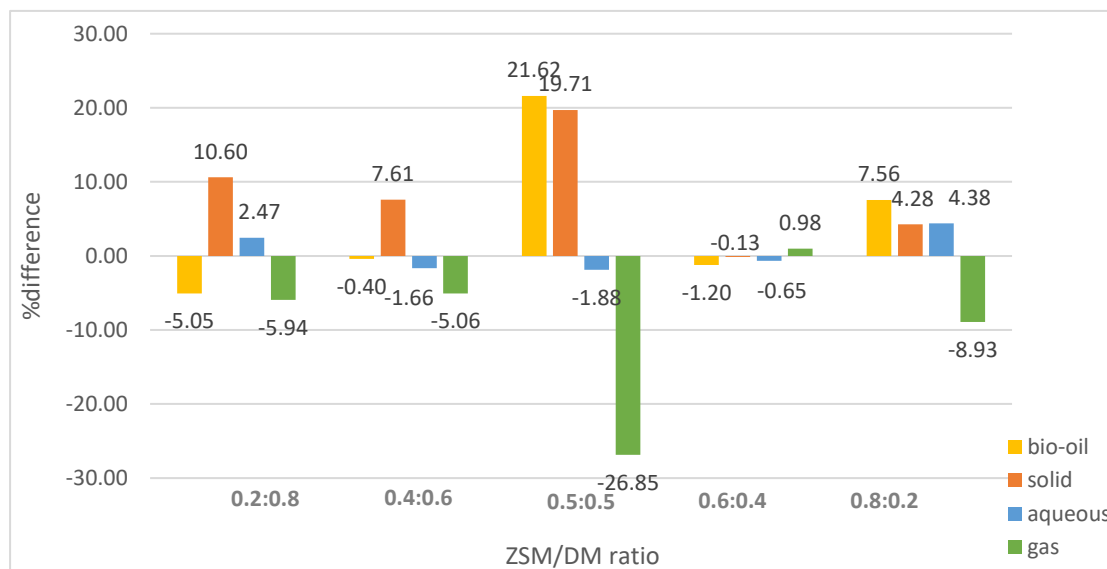
ของตัวเร่งปฏิกิริยามักทำให้มีบริเวณก่อกัมมันต์ซึ่งแสดงความเป็นกรดบรอนสเตทและสามารถเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนและช่วยส่งเสริมการแตกสลายของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนไปเป็นสารมัธยันตร์หรือช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน แต่ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 โดยน้ำหนักไปเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักส่งผลให้น้ำมันชีวภาพของกากกาแฟ เพียงเล็กน้อย ให้ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพ ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 21.01 โดยน้ำหนัก โดยอธิบายได้จากของการแตกสลายเชิงความร้อนขององค์ประกอบจากชีวมวลไปเป็นไฮสาร์ระเหยที่เป็นสารประกอบออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการแพร่ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งบางส่วนเกิดปฏิกิริยาบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ตำแหน่งบีต้าเกิดปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน และเกิดการจัดโครงสร้างไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจนสามารถแพร่ผ่านผิวรูพรุนแล้วเกิดกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาโพลิโกเมอไรเซชัน และเอโรมาติกเซชันทำให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเหมาะสมและถูกนำออกไปยังหน่วยควบแน่นไปเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงสภาพของพื้นที่ก่อกัมมันต์และลดการก่อก่อตัวของกากคาร์บอน หรือโค้กภายในผิว หรือภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยลง และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำหรือระยะเวลาในการไพโรไลซ์เชิงตัวเร่งได้ยาวนานขึ้น

4.3.3.5 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 36 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของกากกาแพ เมื่อสภาวะคงที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 36 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/ H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที พบว่าอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM 0.5 ต่อ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพสูงสุด ร้อยละ 26.50 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วน 0.2 ต่อ 0.8 ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพต่ำสุด ที่ร้อยละ 20.74 โดยน้ำหนัก แสดงว่า Cu/H-ZSM5 มีอิทธิพลการเสริมกันและหักล้างกับ Fe/DM ต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนจาก 0.2 ต่อ 0.8 ไปเป็น 0.4 ต่อ 0.6, 0.6 ต่อ 0.4 และ 0.8 ต่อ 0.2 เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ Cu/H-ZSM5 น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20.74 เป็น 21.72, 21.51 และ 23.38 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



ภาพประกอบ 37 ผลการเสริมหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ของสาหร่ายสไปรูลิน่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 37 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะดำเนินการ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ในทุกอัตราส่วนให้ผลการเสริมกันในเชิงลบต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊ส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่ที่ก่อกัมมันต์ส่งผลให้เป็นบริเวณที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเนื่องจากการแตกตัวเชิงความร้อนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน และส่งเสริมการแตกสลายขั้นทุติยภูมิหรือสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้ อัตราส่วนของ Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM 0.5 ต่อ 0.5 ให้ผลการส่งเสริมกันในเชิงบวกสูงสุดต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพร้อยละ 21.62

4.4 การวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ

4.4.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพที่เกิดจากการไพโรไลซิส ซี้ล้อยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแพ

ตาราง 3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสซี้ล้อยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแพ

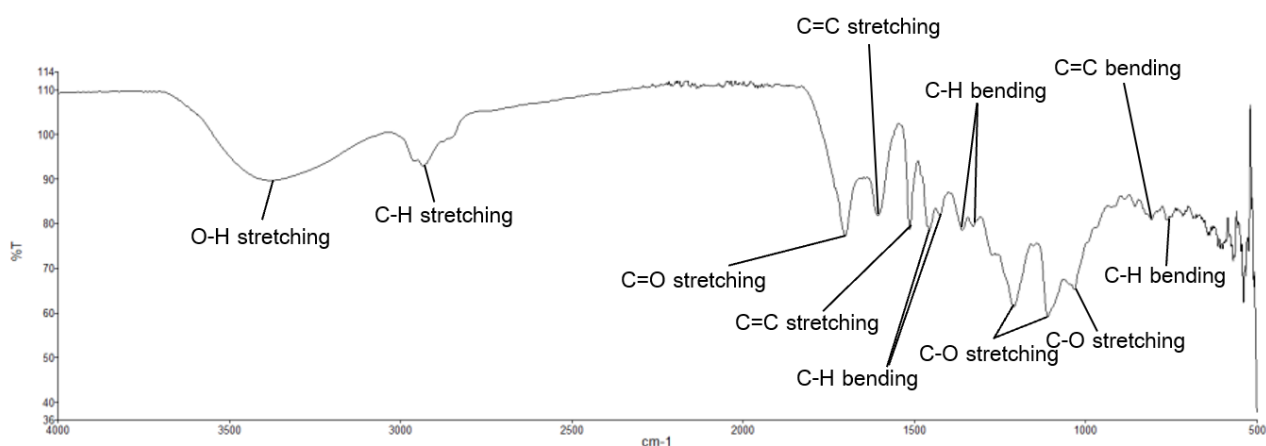
การวิเคราะห์ แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก					
	ซี้ล้อยูคาลิปตัส		สหรัยสไปรูลิน่า		กากกาแพ	
	ไม่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา**	ไม่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา**	ไม่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ตัวเร่ง ปฏิกิริยา**
คาร์บอน (C)	60.24	60.57	66.15	66.72	71.11	71.90
ไฮโดรเจน (H)	7.01	6.90	8.69	9.73	9.22	9.55
ไนโตรเจน (N)	0.51	0.54	11.24	11.60	5.16	6.00
ซัลเฟอร์ (S)	0.22	0.26	0.26	0.42	0.22	0.26
ออกซิเจน (O)*	32.02	31.73	13.66	11.53	14.29	13.29
H/C (โมลต่อโมล)	1.40	1.37	1.57	1.75	1.56	1.64
O/C (โมลต่อโมล)	0.40	0.39	0.14	0.12	0.13	0.14
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	24.71	24.72	32.45	34.52	34.77	34.84
ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg)	23.18	23.22	30.56	32.40	32.76	32.76
ค่าความร้อน (MJ/kg)	24.15	24.18	29.10	29.30	31.41	31.50

หมายเหตุ * คำนวณด้วยวิธีผลต่าง (by different), **เติมตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 ค่าความร้อนสูงและต่ำ (วิธีวิเคราะห์ ASTM D5865) คำนวณจากสมการ 4-1 และ 4-2

จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่เลือกจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราส่วน H/C และ O/C ลดลงจากชีวมวล แสดงว่ามีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนมีปริมาณที่ลดลงสอดคล้องกับผลของค่าความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหากชีวมวลหรือน้ำมันชีวภาพมีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างมากจะทำให้ค่าความร้อนต่ำ โดยชีวมวลมีค่าความร้อน 17.40, 20.83 และ 20.98 MJ/kg และเมื่อเทียบกับกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากับเติมตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM พบว่าอัตราส่วนของ H/C และ O/C มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ แต่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขององค์ประกอบเดิมกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ค่าความร้อนใกล้เคียงกัน คือ น้ำมันชีวภาพของซี่เลื่อยยูคาลิปตัส 24.15 และ 29.10 MJ/kg น้ำมันชีวภาพของสาหร่ายสไปรูลิน่า 29.10 และ 31.41 MJ/kg และน้ำมันชีวภาพของกากกาแฟ 31.41 และ 31.50 MJ/kg ตามลำดับ

4.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

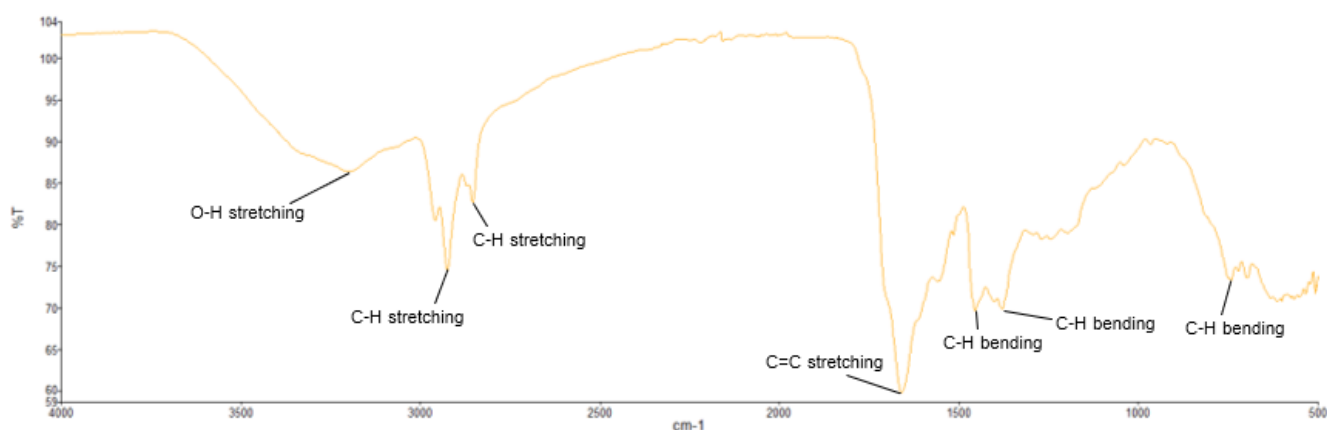
จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสของชี้เลี้ยงจากยูคาลิปตัส สำหรับสายโปรลูรีน่า และกากกาแพ พบว่าหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพประกอบด้วย พันธะระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน มีสารประกอบจำพวกแอลกอฮอล์ ฟีนอล และกรดคาร์บอกซิลิก พันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน มีสารประกอบจำพวกแอลเคน พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน มีสารประกอบจำพวกคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ และเอไมด์ พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน มีสารประกอบจำพวกแอลคีน และอะโรมาติก และพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน มีสารประกอบจำพวกอีเทอร์ กรดคาร์บอกซิลิก และแอลกอฮอล์ แสดงภาพประกอบ 38-40 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 38 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากชี้เลี้ยงยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง 4 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส

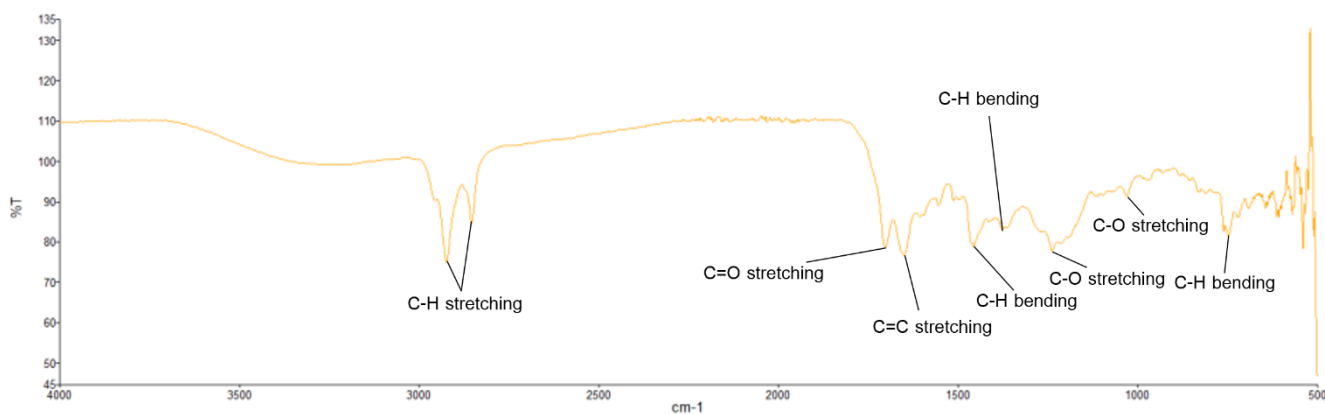
ความยาวคลื่น	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน
717.65 cm^{-1}	C-H bending	โมโน แอโรมาติก
808.71 cm^{-1}	C=C bending	หมู่แอลคีน
1033.53 cm^{-1} และ 1111.24 cm^{-1}	C-O stretching (asymmetric)	ไวนิลเอสเตอร์ซึ่งอยู่ในหมู่เอเทอร์
1210.90 cm^{-1} , 1329.74 cm^{-1} , 1361.86 cm^{-1} และ 1426.61 cm^{-1}	C-H bending (symmetric and asymmetric)	หมู่เมทิลในแอลเคน
1514.60 cm^{-1} และ 1606.74 cm^{-1}	C=C stretching	หมู่แอลคีน
1701.56 cm^{-1}	C=O stretching	เอสเตอร์ซึ่งอยู่ในหมู่คาร์บอนิล
2935.99 cm^{-1}	C-H stretching	C-H แบบยืดของหมู่เมทิลในแอลเคน
3380.50 cm^{-1}	O-H stretching	แอลกอฮอล์และสารประกอบฟีนอลิก



ภาพประกอบ 39 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากส่าห่วยสไปรูลิน่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง 5 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายสไปรูลิน่า

ความยาวคลื่น	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน
742.59 cm^{-1}	C-H bending	โมโน แอโรมาติก
1378.77 cm^{-1} และ 1455.52 cm^{-1}	C-H bending (symmetric and asymmetric)	หมู่เมทิลในแอลเคน
1659.99 cm^{-1}	C=C stretching	หมู่แอลคีน
2854.18 cm^{-1} และ 2924.75 cm^{-1}	C-H stretching	C-H แบบยืดของหมู่ เมทิลในแอลเคน
3198.10 cm^{-1}	O-H stretching	แอลกอฮอล์และ สารประกอบฟีนอลิก



ภาพประกอบ 40 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง 6 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ

ความยาวคลื่น	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน
747.97 cm^{-1}	C-H bending	โมโน แอโรมาติก
1030.98 cm^{-1} และ 1238.29 cm^{-1}	C-O stretching (asymmetric)	ไวนิลเอสเทอร์ซึ่งอยู่ในหมู่เอเทอร์
1377.02 cm^{-1} และ 1456.73 cm^{-1}	C-H bending (symmetric and asymmetric)	หมู่เมทิลในแอลเคน
1650.41 cm^{-1}	C=C stretching	หมู่แอลคีน
1702.26 cm^{-1}	C=O stretching	เอสเทอร์ซึ่งอยู่ในหมู่คาร์บอนิล
2853.58 cm^{-1} และ 2923.66 cm^{-1}	C-H stretching	C-H แบบยืดของหมู่เมทิลในแอลเคน

4.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์

ตาราง 7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำชีวภาพจากซีลี้อยู่คาลิปต์ส ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
2.432	0.235				2-Propanone, 1-hydroxy-	C ₃ H ₆ O ₂
3.762				1.187	Acetic anhydride	C ₄ H ₆ O ₃
3.772	0.621				1,2-Ethandiol, monoacetate	C ₄ H ₈ O ₃
3.772		0.462			1,2-Ethandiol, monoacetate	C ₄ H ₈ O ₃
3.772			0.457		1,2-Ethandiol, monoacetate	C ₄ H ₈ O ₃
3.905				0.715	Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
3.911			0.441		Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
3.915	0.475				Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
3.918		0.319			Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
4.223				0.249	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.230		0.136			3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.237			0.057		3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.814				0.231	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O
4.821		0.150			2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O
4.946				0.936	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
4.957		0.502			2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
4.963	0.309				2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
4.963			0.225		2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.218				0.412	2-Hexanone, 3-methyl-	C ₇ H ₁₄ O
5.229		0.266			2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂
5.232	0.281				2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂
5.441				0.213	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃
5.454	0.099				2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃
5.454		0.106			2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃
6.174				0.319	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.184	0.167				Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.184		0.154			Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.184			0.111		Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.204				0.928	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.214		0.497			2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.217			0.397		2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.221	0.426				2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.413				0.196	1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.416			0.097		1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.423	0.151				1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.423		0.101			1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.671				0.113	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
6.682		0.068			2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.682			0.060		2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.692	0.078				2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.724				0.085	2,5-Furandione, 3-methyl-	C ₅ H ₄ O ₃
6.728			0.080		2,5-Furandione, 3-methyl-	C ₅ H ₄ O ₃
6.732	0.100				2,5-Furandione, 3-methyl-	C ₅ H ₄ O ₃
6.732					2,5-Furandione, dihydro-3-	
		0.071			methylene-	C ₅ H ₄ O ₃
7.106				0.739	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.116		0.356			2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.120	0.374				2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.123			0.205		2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.345				0.263	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.355			0.087		2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.359	0.135				2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.359		0.128			2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.424				1.394	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.432	0.528				Phenol	C ₆ H ₆ O
7.432		0.555			Phenol	C ₆ H ₆ O
7.432			0.263		Phenol	C ₆ H ₆ O
7.736				0.172	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
7.740	0.150				2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
7.740			0.089		2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
7.743		0.104			2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5- dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
8.191	2.340				2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.194			3.977		2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.195			2.285		2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.198		2.481			2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.373			0.273		2-Cyclopenten-1-one, 2,3- dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.377			0.097		2-Cyclopenten-1-one, 2,3- dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.380	0.167				2-Cyclopenten-1-one, 2,3- dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.380		0.150			2-Cyclopenten-1-one, 2,3- dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.44			0.996		3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.443	0.783				3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.443			0.607		3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.447		0.650			3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.639	0.956				Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.639			1.556		Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.642			0.484		Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.643		0.721			Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.977			3.050		p-Cresol	C ₇ H ₈ O

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
8.978	1.482				p-Cresol	C ₇ H ₈ O
8.981		1.405			p-Cresol	C ₇ H ₈ O
8.981			0.955		p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.196				1.673	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.197	1.471				Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.197		1.548			Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.197			1.262		Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.250	1.548				6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.253		1.189			6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.253			1.249		6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.253				1.209	6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.571				0.325	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.578	0.306				Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.578		0.243			Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.578			0.274		Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.674				0.673	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2- hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.681	0.518				2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2- hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.681		0.565			2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2- hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.681			0.605		2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2- hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
10.112	0.814	0.699	0.540		Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.118				1.445	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
10.220			0.462		1,3-Dimethyl-3,4,5,6-tetrahydro- 2(1H)-pyrimidinone	C ₈ H ₁₂ N ₂ O
10.225	0.399				1,3-Dimethyl-3,4,5,6-tetrahydro- 2(1H)-pyrimidinone	C ₈ H ₁₂ N ₂ O
10.228		0.433			1,3-Dimethyl-3,4,5,6-tetrahydro- 2(1H)-pyrimidinone	C ₈ H ₁₂ N ₂ O
10.387				0.754	Benzeneethanol, 4-hydroxy-	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.388		0.434			Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.42				1.142	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.421	0.580				Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.421			0.430		Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.424		0.607			Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.795				2.641	2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.796	2.624				2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.796		2.563			2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.796			2.401		2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.905	1.878				Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
10.911				1.290	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
10.915		1.712			Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
10.925			1.126		Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.055	1.169				1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d- glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄
11.065		0.861			1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d- glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄
11.068			1.143		1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d- glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
11.297	0.499				1,6-Octadiene, 3-ethoxy-3,7-dimethyl-	C ₁₂ H ₂₂ O
11.356			0.418		2-Isopropoxyphenol	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.357		0.357			2-Isopropoxyphenol	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.360	0.448				2-Isopropoxyphenol	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.446	0.284				Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.446			0.140		2,4-Dimethoxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.446				0.491	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.449		0.221			Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.808	2.207				1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.808		1.568			1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.811			0.918		1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.811				1.317	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.861			1.252		4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.864	1.555				4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.864		1.372			4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.867				1.848	4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.970	2.160				Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
11.977				2.225	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
11.982		1.635			Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
11.984			1.426		Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.046				2.325	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂
12.047	2.485	2.306	2.569		Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
12.534	0.630	0.663	0.545	0.658	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂
12.933	9.808				Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
12.936		1.269		1.552	Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
12.943			1.190		Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.038				8.627	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.039	9.808				Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.042		10.716			Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.045			11.97		Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.128	0.849				Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.131		0.990	0.989	1.024	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.178	1.305	0.874	0.462		Phenol, 3,4-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.178				0.709	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.261	0.745	0.674	0.788	0.594	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂
13.686	1.602				Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.689		1.605			Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.689			1.702	1.743	Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.795	0.973				Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.795			0.966		Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.798				1.092	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.799		0.964			Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
13.885	0.528				1,4-Benzenediol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂
14.286	6.159				3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.286			4.602		3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.290		6.789			3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.290			7.783		3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.332				3.587	trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.333	4.470				trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.336		4.565			trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.336			3.902		trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.804	1.357				Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃
14.804		1.237			Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃
14.804			0.919	1.349	Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃
15.076	0.349	0.344			2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.079				0.514	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
0				2		
15.080			0.739		2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.272	3.847				4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.272			2.122		4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.275		4.127			4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.275			5.956		4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.348	1.332				2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.348			1.414	0.855	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
15.352		1.270			2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.733	2.100				Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.736		1.941	1.642	1.386	Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.966	0.367		0.188		1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.968				0.293	1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.969		0.325			1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
16.181	2.663				Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.184		3.330	3.246	2.418	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.261	1.145				2,6-Dimethoxy-4-propylphenol	C ₁₁ H ₁₆ O ₃
16.264		1.267	1.677	0.562	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol	C ₁₁ H ₁₆ O ₃
16.745	3.112	3.342			2-Butanone, 4-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.745			3.493		2-Hydroxy-4-isopropyl-7-methoxytropone	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.745				2.447	2-Butanone, 4-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.848	2.895	2.964	2.951	2.575	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C ₉ H ₁₀ O ₄
17.299				5.386	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
17.300	6.853				(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
17.303		7.168	7.954		(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
17.668	3.392	3.358	3.196	2.483	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄
18.066	3.732			2.280	Syringylacetone	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.070		4.010	4.591		Syringylacetone	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.308				0.553	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
18.315	0.240				2-Allyl-3,6-dimethoxybenzyl alcohol	C ₁₂ H ₁₆ O ₃
18.561	0.461				trans-Sinapyl alcohol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.564		0.435			cis-Sinapyl alcohol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.564			0.436		trans-Sinapyl alcohol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.574				0.481	Isopropyl myristate	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
18.630	1.444				1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.630			1.326		1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.633				1.294	1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.634		1.261			1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.892				2.441	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
18.893		0.483			Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
19.334		1.033			Dihydrosyringenin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄
19.335	1.037				Dihydrosyringenin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄
19.341			1.302		Dihydrosyringenin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄

ตาราง 7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
19.357				0.872	Dihydrosyringin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄
19.911	0.302				n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
19.915		0.467	0.443		n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
19.924				1.325	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.203	0.639		0.742		3,5-Dimethoxy-4- hydroxycinnamaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
20.203		0.689			trans-Sinapaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
20.203			0.747		trans-Sinapaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
21.976		0.326	0.333	0.509	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.539	2.056				9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.542		2.336	2.371	4.720	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
25.859	0.604				(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'- dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄
25.863		0.603	0.717		(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'- dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄
25.866			0.418		(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'- dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄
26.048			0.285		3',4'-Dimethoxyflavonol	C ₁₇ H ₁₄ O ₅
26.380	0.752	0.880	0.986		Phenol, 4,4'-methylenebis[2,6- dimethoxy-	C ₁₇ H ₂₀ O ₆

ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำชีวมวลจากพืช
 สหราชอาณาจักร ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส
 ไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5
 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 และที่อุณหภูมิ 600
 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และใช้ตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 550
 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
2.415	0.068	0.064	0.093	Benzene	C ₆ H ₆
2.817			0.171	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
2.840	0.186			Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
2.843		0.243		Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
2.956	0.060			2-Propanamine, N-(1-methylethylidene)-	C ₆ H ₁₃ N
3.351		0.091		3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O
3.354			0.172	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O
3.371	0.111			2-Pentene, 4-methyl-, (E)-	C ₆ H ₁₂
3.487	0.038	0.053	0.073	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
3.835			0.188	Propanoic acid, 2-methyl-	C ₄ H ₈ O ₂
3.849	0.060			Propanoic acid, 2-methyl-	C ₄ H ₈ O ₂
3.865	0.943	0.797		Acetamide	C ₂ H ₅ NO
3.912			0.913	Acetamide	C ₂ H ₅ NO
3.938		0.708		Acetamide	C ₂ H ₅ NO
4.164		0.035		Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
3.351		0.091		3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
3.354			0.172	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O
3.371	0.111			2-Pentene, 4-methyl-, (E)-	C ₆ H ₁₂
3.487	0.038	0.053	0.073	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
3.835			0.188	Propanoic acid, 2-methyl-	C ₄ H ₈ O ₂
3.849	0.060			Propanoic acid, 2-methyl-	C ₄ H ₈ O ₂
3.865	0.943	0.797		Acetamide	C ₂ H ₅ NO
3.912			0.913	Acetamide	C ₂ H ₅ NO
3.938		0.708		Acetamide	C ₂ H ₅ NO
4.164		0.035		Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
4.217	0.665			3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.220		0.481	0.606	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.953	0.531	0.602	0.677	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.166			0.224	Butanoic acid, 3-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.209		0.467		Butanoic acid, 3-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.216	0.498			Butanoic acid, 3-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.325			0.132	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.358		0.617		Butanoic acid, 2-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.362	0.395			Butanoic acid, 2-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.421			0.364	Propanamide	C ₃ H ₇ NO
5.445	0.354			3-Octanamine	C ₈ H ₁₉ N
5.451		0.699		Propanamide	C ₃ H ₇ NO
5.474			0.442	3-Octanamine	C ₈ H ₁₉ N
6.191		0.251		Propanamide, 2-methyl-	C ₄ H ₉ NO

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
6.198	0.126			Propanamide, 2-methyl-	C ₄ H ₉ NO
6.211			0.130	Propanamide, 2-methyl-	C ₄ H ₉ NO
6.970			0.139	Pentanoic acid, 3-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
6.987		0.147		Pentanoic acid, 3-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.011	0.692			3-Amino-5-tert-butylpyrazole	C ₇ H ₁₃ N ₃
7.047			0.648	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.077		0.848		Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.186		0.181		Dimethyl trisulfide	C ₂ H ₆ S ₃
7.189			0.105	Dimethyl trisulfide	C ₂ H ₆ S ₃
7.193	0.344			Pyrrole, 1-methyl-3-(1,1-dimethylethyl)-	C ₉ H ₁₅ N
7.329	0.380			1-Methyl-2-tert-butylpyrrole	C ₉ H ₁₅ N
7.349		0.219		Pyrrole, 1-methyl-3-(1,1-dimethylethyl)-	C ₉ H ₁₅ N
7.379	0.436			Phenol, 4-(ethylamino)-	C ₈ H ₁₁ NO
7.432			4.264	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.442		5.322		Phenol	C ₆ H ₆ O
7.449	4.672			Phenol	C ₆ H ₆ O
7.591	4.341			Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.598		2.305		Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.611			0.768	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.750	1.434			Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
7.757		1.863	1.576	Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
7.860	0.287			2-Aminopyridine	C ₅ H ₆ N ₂
7.863		0.197		2-Aminopyridine	C ₅ H ₆ N ₂

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
7.880			0.128	2-Aminopyridine	C ₅ H ₆ N ₂
8.643		1.151		Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.646	0.796		0.849	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.713		0.248		2-Amino-4-methylpyrimidine	C ₅ H ₇ N ₃
8.875	1.200			Pyridine, 2-ethyl-4,6-dimethyl-	C ₉ H ₁₃ N
8.878		0.546		Pyridine, 2-ethyl-4,6-dimethyl-	C ₉ H ₁₃ N
8.911			4.143	4-tert-Butylpiperidine	C ₉ H ₁₉ N
8.912		1.724		2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.915	1.028			4-tert-Butylpiperidine	C ₉ H ₁₉ N
8.984			6.055	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
8.985		6.369		p-Cresol	C ₇ H ₈ O
8.988	5.715			p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.177		0.130		2,5-Pyrrolidinedione, 1-methyl-	C ₅ H ₇ NO ₂
9.353		0.150		2-Pyridinamine, 3-methyl-	C ₆ H ₈ N ₂
9.465			1.111	Hexanamide	C ₆ H ₁₃ NO
9.469	2.802	2.040		2-Ethyl-6-isopropyl pyridine	C ₁₀ H ₁₅ N
9.621			5.792	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.625	2.556	3.350		4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.794			1.173	Succinimide	C ₄ H ₅ NO ₂
9.804		0.989		Succinimide	C ₄ H ₅ NO ₂
9.811	0.973			Succinimide	C ₄ H ₅ NO ₂
9.966			0.622	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
9.967		0.803		Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
9.968	0.699			Benzyl nitrile	C ₈ H ₇ N
10.112		2.055	2.237	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.123	1.762			Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.358		0.991		1-Methyl-1H-imidazole-4-carboxamide	C ₅ H ₇ N ₃ O
10.358			1.444	2-Methylpyrazole-3-carboxamide	C ₅ H ₇ N ₃ O
10.365	0.893			2-Methylpyrazole-3-carboxamide	C ₅ H ₇ N ₃ O
10.404			1.990	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.408		1.605		Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.415	1.524			Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.611	2.759			2-Ethyl-3,5-dimethylpyridine	C ₉ H ₁₃ N
10.796	1.173			Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
11.042	3.165			Pyrazolo[1,5-a]pyridine, 3,3a,4,7-tetrahydro-2,3,3-trimethyl-, (3aS)-	C ₁₀ H ₁₆ N ₂
11.211	0.685			Spiro[5.5]undec-8-en-1-one	C ₁₁ H ₁₆ O
11.304			0.178	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.307		0.316		Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.311	0.256			Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.370	0.422	0.596	0.771	1H-Pyrrole-2,5-dione, 3-ethyl-4-methyl-	C ₇ H ₉ NO ₂
11.480	1.385	1.521		Benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N
11.483			1.064	Benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N
12.259			5.277	Indole	C ₈ H ₇ N
12.260	5.450	6.485		Indole	C ₈ H ₇ N
12.558	1.168			1,2,4-Cyclopentanetrione, 3-(2-pentenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
13.520		2.902	3.029	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
13.521	3.592			1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
14.499	0.854			1,4-Benzenediol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O ₂
14.742	0.668			3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.745			0.627	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
15.083		0.652	0.915	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.084	0.485			2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.163	0.952	0.755	0.715	Phenylpropanamide	C ₉ H ₁₁ NO
15.405	0.640			2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-, (R)-	C ₁₁ H ₁₆ O ₂
15.405		0.540		2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-, (R)-	C ₁₁ H ₁₆ O ₂
15.408			0.486	2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-, (R)-	C ₁₁ H ₁₆ O ₂
15.727			1.950	3-(4-Hydroxyphenyl)propionitrile	C ₉ H ₉ NO
15.734		1.106		3-(4-Hydroxyphenyl)propionitrile	C ₉ H ₉ NO
15.737	0.872			3-(4-Hydroxyphenyl)propionitrile	C ₉ H ₉ NO
17.221	3.234			Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.223			3.044	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.224		3.577		Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.399			1.210	3-Methyl-2,3,6,7,8,8a-hexahydropyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione	C ₈ H ₁₂ N ₂ O ₂
17.400	0.512			3-Methyl-2,3,6,7,8,8a-hexahydropyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione	C ₈ H ₁₂ N ₂ O ₂

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
17.400		1.177		Uric acid	C ₅ H ₄ N ₄ O ₃
17.869			0.637	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂
17.871	1.080			Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂
17.871		0.821		Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂
18.717		2.728	2.288	Neophytadiene	C ₂₀ H ₃₈
18.718	0.668			Neophytadiene	C ₂₀ H ₃₈
18.793			2.483	Cyclo(L-prolyl-L-valine)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₂
18.794	2.722			Cyclo(L-prolyl-L-valine)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₂
18.797		2.497		Cyclo(L-prolyl-L-valine)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₂
19.156	2.231			Linoleyl methyl ketone	C ₁₉ H ₃₄ O
19.158			1.240	Linoleyl methyl ketone	C ₁₉ H ₃₄ O
19.341	1.426			Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.344			4.720	Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.345		4.750		Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.673	4.291			Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-3-(2-methylpropyl)-	C ₁₁ H ₁₈ N ₂ O ₂
19.679			0.866	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-3-(2-methylpropyl)-	C ₁₁ H ₁₈ N ₂ O ₂
19.780	0.896			Octahydrodipyrrolo[1,2-a:1',2'- d]pyrazine-5,10-dione-, (5aR,10aR) (isomer 2)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₂

ตาราง 8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
19.782			1.884	Octahydrodipyrrolo[1,2-a:1',2'- d]pyrazine-5,10-dione-, (5aR,10aR) (isomer 1)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₂
19.783		1.848		Octahydrodipyrrolo[1,2-a:1',2'- d]pyrazine-5,10-dione-, (5aR,10aR) (isomer 1)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₂
19.995			8.721	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.002	1.543	9.153		n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.165	5.237			9H-Pyrido[3,4-b]indole	C ₁₁ H ₈ N ₂
20.174			0.658	9H-Pyrido[3,4-b]indole	C ₁₁ H ₈ N ₂
21.993	0.583		14.337	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
21.997		15.124		Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.539			4.767	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.540	10.501			9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.543		4.334		9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.735			0.905	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO
23.736	3.983	0.779		Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO

ตาราง 9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำชีวภาพจากกากกาแฟ ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร ต่อนาที เวลา 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
2.415		0.056		0.047	Benzene	C ₆ H ₆
2.418	0.032		0.093		Benzene	C ₆ H ₆
2.793				0.051	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
2.797		0.082			Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
3.490				0.031	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
4.124				0.094	Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
4.154		0.113			Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
4.227		0.087		0.215	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.233			0.104		3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.237	0.037				3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.953		0.467			2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
4.957				0.344	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
4.963			0.359		2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
4.966	0.126				2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.224		0.421			2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂
6.181		0.200			Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.924				0.039	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
6.957		0.118			Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.127		0.195			2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.422			5.048		Phenol	C ₆ H ₆ O
7.425	1.770				Phenol	C ₆ H ₆ O
7.428			1.894		Phenol	C ₆ H ₆ O
7.429		6.632			Phenol	C ₆ H ₆ O
7.621			0.863		Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.634		0.246			Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.637			0.139		Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.640	0.049				Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.780		0.164			Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
7.969			0.125		Piperidine, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₅ N
8.185		0.662	0.590		2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.188	0.207				2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy- 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.377		0.164			2-Cyclopenten-1-one, 2,3- dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.387	0.020				2-Cyclopenten-1-one, 2,3- dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.639	0.597				Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.640		2.079			Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.643			0.058	0.519	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.915			1.702		1,2,3-Trimethylpiperidin-4-one	C ₈ H ₁₅ NO

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
8.915				2.074	2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.921	0.674				2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.925		1.848			2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.978			1.922		p-Cresol	C ₇ H ₈ O
8.981	1.831				p-Cresol	C ₇ H ₈ O
8.985		4.825		1.765	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.037			0.637		Heptanoic acid	C ₇ H ₁₄ O ₂
9.058		0.416			Heptanoic acid	C ₇ H ₁₄ O ₂
9.193			5.222		Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.194		0.524			Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.479			0.156		2-Ethyl-6-isopropyl pyridine	C ₁₀ H ₁₅ N
9.529			0.566		3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.542		0.559			3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.552			0.266		3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.565	0.487				3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.621			1.389		4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.622			1.929		4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.625		0.323			4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.674			0.683		2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
9.675		0.539			2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2- hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.678	0.239				2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2- hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.771				0.301	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.797				0.602	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.798		0.498			3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.807	0.211				3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.956	0.317				Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
9.956				0.903	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
9.957		0.898		0.281	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.073				0.266	Glutarimide	C ₅ H ₇ NO ₂
10.079	0.093				Glutarimide	C ₅ H ₇ NO ₂
10.080		0.164			Glutarimide	C ₅ H ₇ NO ₂
10.113		1.612			Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.113				0.543	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.116	0.662				Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.332				0.305	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
10.388		1.011			Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.391	0.511				Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.418			2.756	1.050	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
10.424	0.966				Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.425		2.161			Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.498				0.102	Octanoic acid	C ₈ H ₁₆ O ₂
10.560			0.313		Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.564		0.508		0.180	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.567	0.110				Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.617				0.074	3,4-Pyridinedimethanol, 6-methyl-	C ₈ H ₁₁ NO ₂
10.789			1.413		Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.792	0.495				Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.793		1.021			Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.803				0.590	Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.889		0.175	0.243		4-Pyridinamine, 2,6-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ N ₂
10.892	0.085				4-Pyridinamine, 2,6-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ N ₂
10.948			0.313		Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
10.954	0.110	0.482			Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.198				0.086	Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.201		0.190	0.243		Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.204	0.085				Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.291		0.323		0.090	Phenol, 3-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂ O
11.293	0.110				Phenol, 3-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂ O
11.347				0.105	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.350	0.114	0.339			Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.390			0.556		Patulin	C ₇ H ₆ O ₄

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
11.443		0.416	0.544	0.184	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.446	0.195				Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.503		0.616	1.262		Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.506				0.305	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.509	0.191				Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.745		0.826	19.32	0.504	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.748	0.442				Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.969		7.889			Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
11.970			0.729		Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
11.975				5.182	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
11.977	6.774				Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.256				0.324	Indole	C ₈ H ₇ N
12.293		0.559			Naphthalene, 1-methyl-	C ₁₁ H ₁₀
12.528		0.406			2H-Inden-2-one, 1,4,5,6,7,7a- hexahydro-7a-methyl-, (S)-	C ₁₀ H ₁₄ O
12.950	0.483				Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.520			1.679	0.621	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
13.526	0.662				1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
13.637		0.678			Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀
14.742		0.421			3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.744			0.463		3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.745				0.238	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.748	0.248				3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.854	0.162				1H-Indole, 5,7-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₁ N

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
14.900			1.123		Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
14.901		2.233		0.519	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
14.904	1.136				Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
15.070		0.888			2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.073			1.413	0.562	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.076	0.637				2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
16.092		0.909	1.424	0.375	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
16.095	0.495				Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
17.144		0.765			1-Heptadecene	C ₁₇ H ₃₄
17.224		2.151		1.136	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.226	1.003				Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
18.299		0.652		0.332	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
18.305	0.386				Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
18.949				39.05	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
18.972	40.588				Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
19.351		3.793		2.538	2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O
19.357	2.654				2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O
19.584		1.145			Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
19.587				0.652	Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
19.589	0.779				Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
20.015		25.603		18.13	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.024	19.352				n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.303			1.957		Eicosane	C ₂₀ H ₄₂

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
21.027		1.299			Z-8-Methyl-9-tetradecen-1-ol formate	$C_{16}H_{30}O_2$
21.030	0.686				Z-8-Methyl-9-tetradecen-1-ol formate	$C_{16}H_{30}O_2$
21.242			0.567		Heneicosane	$C_{21}H_{44}$
21.306		1.201			Octadecanenitrile	$C_{18}H_{35}N$
21.309	0.690			0.676	Octadecanenitrile	$C_{18}H_{35}N$
21.488			7.144		Methyl stearate	$C_{19}H_{38}O_2$
21.489		0.303			Methyl stearate	$C_{19}H_{38}O_2$
21.494	0.199				Methyl stearate	$C_{19}H_{38}O_2$
21.592		1.617			9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	$C_{18}H_{32}O_2$
21.595				1.031	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	$C_{18}H_{32}O_2$
21.601	1.664				9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	$C_{18}H_{32}O_2$
21.604			5.662		9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	$C_{18}H_{32}O_2$
21.641		3.362			Oleic Acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.644				2.472	Oleic Acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.647	2.504				Oleic Acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.654			7.086		Oleic Acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.691		2.197			cis-Vaccenic acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.694	1.985			1.457	cis-Vaccenic acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.697			4.261		cis-Vaccenic acid	$C_{18}H_{34}O_2$
21.840		2.803			Octadecanoic acid	$C_{18}H_{36}O_2$
21.844				1.804	Octadecanoic acid	$C_{18}H_{36}O_2$

ตาราง 9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%				Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst	60 (min)	600 (°C)		
21.846	2.484				Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
21.850			4.597		Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
22.006		2.351			Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
22.010			3.171		Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
22.012	1.494				Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
22.016			1.598		Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
22.139			3.728		Docosane	C ₂₂ H ₄₆
23.543		3.891			9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.546	1.611		7.560	3.308	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.742		0.924		1.011	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO
23.745	0.560		2.061		Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสของซีเลื้อยยูคาลิปตัส สหรัยสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี บ่งชี้ชนิดของสารประกอบในน้ำมันชีวภาพซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่เป็น แอลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน แอโรมาติก สารประกอบออกซิเจนเนท และสารประกอบพอลิแอโรมาติก และพบว่าที่ภาวะดำเนินการที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5 ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด และให้องค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวภาพประกอบไปด้วย สารประกอบแอลิฟาติก 24.51% แอโรมาติก 22.89% พอลิแอโรมาติก 26.72% และสารประกอบออกซิเจนเนท 25.88% ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ไปเป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธภณัฒ์ผสมประเภทกรด-เบส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบชั้นตอนเดียว ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Univariate Experimental Design ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาที่ละปัจจัย โดยมีตัวแปร คือ อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25-75 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45-75 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3-10 โดยน้ำหนัก และ อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซีโอไลท์ และ เหล็ก/โดโลไมต์ 0.2: 0.8 และ 0.8:0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ที่สภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง ปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซีโอไลท์ และ เหล็ก/โดโลไมต์ 0.5:0.5 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพของสาหร่ายสไปรูลิน่า กากกาแฟ และชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส ร้อยละ 40.61 โดยน้ำหนัก กากกาแฟร้อยละ 26.50 โดยน้ำหนัก และชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัสร้อยละ 20.19 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมตรี และแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี เมื่อการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่าย สามารถจำแนกร้อยละของพื้นที่พีคที่เป็นสารประกอบแอลิฟาติก 24.51% แอโรมาติก 22.89% พอลิแอโรมาติก 26.72% และสารประกอบออกซิเจนเนท 25.88% ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง ปฏิกิริยาคอปเปอร์/ซีโอไลท์ และ เหล็ก/โดโลไมต์ 0.5 ต่อ 0.5 พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสชี้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ได้มากกว่า ชี้้เลี้ยงจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของ คอปเปอร์ซีโอไลต์ และเหล็ก/โดโลไมต์ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 ต่อ 0.5 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลา 45 นาที พบว่าอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมากที่สุดคือที่อัตราส่วน 0.5 ต่อ 0.5 ทั้งของซีลีเนียมจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสพบว่าซีลีเนียมยูคาลิปตัสเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากร้อยละของผลิตภัณฑ์แก๊สสูงมากกว่าทั้งสาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ ในส่วนของสาหร่ายสไปรูลิน่าเหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพเนื่องจากได้ร้อยละของของเหลวมากที่สุด และกากกาแฟเหมาะสำหรับการนำไปผลิตถ่านชีวภาพเนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของของแข็งมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องปฏิกรณ์ควรมีขนาดใหญ่กว่านี้และมีพื้นที่ในการบรรจุสารตัวอย่างให้ได้เพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะได้ปริมาณของน้ำมันที่มากขึ้นเพื่อให้พอเหมาะกับการนำไปวิเคราะห์
2. สามารถต่อยอดและหาแนวทางไปสู่การขยายในเชิงพาณิชย์ได้เนื่องจากในประเทศของเราวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีมากขึ้นทำให้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อเพิ่มเป็นสารเคมีที่มีมูลค่าได้

บรรณานุกรม

- ahmad, s. f. k. (2022). Study on characterization of bio-oil derived from sugarcane bagasse (*Saccharum barberi*) for application as biofuel. *Clean Energy*, 1062-1069.
- Carrier, M., Fournet, R., Sirjean, B., Amsbury, S., Alfonso, Y. B., Pontalier, P.-Y., & Bridgwater, A. (2020). Fast Pyrolysis of Hemicelluloses into Short-Chain Acids: An Investigation on Concerted Mechanisms. *Energy & Fuels*, 34(11), 14232-14248. Retrieved 2020/11/19, from <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02901>
- Charusiri, W., & Vitidsant, T. (2017). Upgrading bio-oil produced from the catalytic pyrolysis of sugarcane (*Saccharum officinarum* L) straw using calcined dolomite. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 6, 114-123. Retrieved 2017/12/01/, from Retrieved form <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554117300372>
- Hematkhah, R., Majidian, N., Hallajisani, A., & Samipoorgiri, M. (2023). Investigation of catalytic pyrolysis of spirulina for bio-oil production. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(5), 104691. Retrieved 2023/05/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535223001533>
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, 39, 109-143. Retrieved 2019/12/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209549561830901X>
- Jeon, M.-J., Jeon, J.-K., Suh, D. J., Park, S. H., Sa, Y. J., Joo, S. H., & Park, Y.-K. (2013). Catalytic pyrolysis of biomass components over mesoporous catalysts using Py-GC/MS. *Catalysis Today*, 204, 170-178. Retrieved 2013/04/15/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586112005470>

- Kumar, M., Upadhyay, S. N., & Mishra, P. K. (2022). Pyrolysis of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Leaves and Characterization of Products. *ACS Omega*, 7(32), 28052-28064. Retrieved 2022/08/16, from <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02076>
- Li, H., Dong, Z., Wang, B., Wu, W., Cao, M., Zhang, Y., & Liu, Z. (2023). High-quality bio-oil production via catalytic pyrolysis of biocrude oil from hydrothermal liquefaction of microalgae *Spirulina*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 173, 106057. Retrieved 2023/08/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237023002012>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. Retrieved 2002/05/01/, from Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>
- Mohammadparast, F., Halladj, R., & Askari, S. (2015). The Crystal Size Effect of Nano-Sized ZSM-5 in the Catalytic Performance of Petrochemical Processes: A Review. *Chemical Engineering Communications*, 202. Retrieved 04/01, from
- Rijo, B., Soares Dias, A. P., Ramos, M., de Jesus, N., & Puna, J. (2021). Catalyzed pyrolysis of coffee and tea wastes. *Energy*, 235, 121252. Retrieved 2021/11/15/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221015000>
- Varma, A. K., Thakur, L. S., Shankar, R., & Mondal, P. (2019). Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. *Waste Management*, 89, 224-235. Retrieved 2019/04/15/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19302296>
- Yin, C.-Y. (2011, 2011/03/01). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90(3), 1128-1132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>

กรมป่าไม้. (2554). ยุคาลิปตัส พันธุ์ไม้เศรษฐกิจ. ส่วนส่งเสริมการปลูกไม้เศรษฐกิจ สำนักเศรษฐกิจ

การป่าไม้.

นพิตา หิญาชีระนันท์. (2556). เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาเคมีเทคนิค.

วิชากร จารุศิริ. (2561). พลังงานจากชีวมวลเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้ (1 ed.). บริษัท ไอ. เอส.
พรินติ้ง เฮ้าส์ จำกัด.

สุภาวดี ผลประเสริฐ. (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพวงกลิ้งในเซลล์โลสสำหรับการผลิตเอทานอล.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี., 22(25): 642-649.





ภาคผนวก ก

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

1.) การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

โดยการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง แก๊ส เป็นดังนี้

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (% Liquid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (%Solid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็ง}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส (% Gas yield)

$$= 100 - (\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว} + \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง} + \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำ})$$

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของน้ำ (%Aqueous yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว (ก่อนระเหย - หลังระเหย)}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณเป็นการแยกองค์ประกอบอย่างง่าย สามารถ แบ่ง ออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1.1 การวิเคราะห์ น้ำหรือความชื้น ถ้ำ สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

วิธีการวิเคราะห์ความชื้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis: ASTM D7582) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด ซึ่งใช้กัน ปัจจุบันเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถหาค่าน้ำหรือความชื้น ถ้ำ สารระเหย และคาร์บอนคง ตัวออกมาได้ทันที จากการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก และการสลายตัวของความชื้น สารอินทรีย์ และ เหลือเฉพาะน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายเนื่องจากความร้อน

อุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด
2. ถ้วยครุชีเบิล
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ทำการเผาครุชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำ ออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ใส่ครุชีเบิลลงในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิ เมตริกพร้อม กับจุดวัดน้ำหนักด้วยครุชีเบิลแล้วบันทึกค่า
3. ใส่ซีลีเนียมคาลิปตัส สำหรับสไปรูลิน่า หรือกากกาแฟในครุชีเบิลลงในเครื่องวิเคราะห์ การสลายตัวทาง ความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ประมาณ 1 กรัม พร้อมบันทึกน้ำหนัก
4. ตั้งค่าอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ 950 องศาเซลเซียส
5. รวผลการวิเคราะห์

สูตรการคำนวณในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

$$\text{Moisture} = ((W+W_1)-W_1)/W \times 100$$

โดย Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของชีวมวลที่เสียน้ำในช่อง 0-120 องศาเซลเซียส (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

$$\text{Ash} = (W_3 \times W_4)/W \times 100$$

โดย Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

W_3 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักเถ้า (กรัม)

W_4 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

$$\text{Volatile matter} = (W_5 \times W_6)/W \times 100$$

โดย Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

W_5 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักชีวมวลก่อนเผา (กรัม)

W_6 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิดกับน้ำหนักชีวมวลหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

$$\text{Fixed carbon} = 100 - \text{Moisture} - \text{Ash} - \text{Volatile matter}$$

โดย Fixed carbon คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

1.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

(Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke: ASTM D5373) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH และ S (CHN and S analyzer) จากบริษัท LECO จำกัด ตัวอย่างจะถูกหลอม ภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนภายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) โดยซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และคาร์บอนจะถูก เปลี่ยนให้เป็นสารประกอบคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หลังจาก ขั้นตอนการเผาไหม้ แก๊สจะเดินทางผ่านตัวกรองฝุ่นและดูดความชื้นออก เพื่อให้ก๊าซบริสุทธิ์ มากขึ้น ในขั้นตอนต่อไปซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกวัดที่ชุดตรวจจับสนุญาณแบบอินฟราเรด (Infrared cells) ในเครื่อง หลังจากการวัดค่าซัลเฟอร์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูก ออกซิเดชัน เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ปริมาณคาร์บอนจะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยเซลล์อินฟราเรด

1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

วิธีการวิเคราะห์ค่าความร้อน (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke: ASTM D5865) ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) รุ่น AC500 จาก บริษัท LECO จำกัด มีหลักการทำงาน โดยใส่ตัวอย่างลงไปในกลุ่มบอมบ์ เพื่อเผา จน ตัวอย่างลุกไหม้ ให้ความร้อนออกมา ความร้อนจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ล้อมรอบกลุ่มบอมบ์ เทอร์มิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ จะวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ และรายงานผลค่า พลังงานความร้อน ออกมา

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสชี้เลื่อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายไปรูลิน่า และกากกาแพ

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสจากชี้เลื่อยจากเศษไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายไปรูลิน่า และกากกาแพด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ก.1 ก.2 ก.3 ก.4 และ ก.5

ตาราง ก.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสชี้เลื่อยจากไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายไปรูลิน่า และกากกาแพ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ที่ เป็นน้ำ
ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากชี้เลื่อยยูคาลิปตัส				
500	13.93	22.75	48.36	14.96
550	18.94	23.23	43.19	14.64
600	17.84	25.99	48.73	7.44
ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากสายไปรูลิน่า				
500	39.30	14.38	10.76	35.57
550	39.57	17.81	28.46	33.93
600	31.21	13.19	28.46	27.14
ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากกากกาแพ				
500	24.38	32.10	31.58	11.93
550	24.56	33.19	30.91	11.34
600	20.88	29.39	37.46	12.17

ตาราง ก.2 ผลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไฟ
โรไลซิสซีล้อยจากไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสไปรูลิน่า และกากกาแฟ

อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ที่ เป็นน้ำ
ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากซีล้อยยูคาลิปตัส				
25	12.47	21.27	49.08	17.18
50	18.95	22.11	47.25	11.70
75	14.82	21.42	49.44	14.31
ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจาก สำหรับสไปรูลิน่า				
25	28.35	19.29	30.24	22.12
50	39.41	18.59	7.88	34.12
75	26.65	15.06	36.84	21.45
ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจาก กากกาแฟ				
25	23.13	30.29	35.17	11.41
50	24.42	34.31	30.17	11.10
75	24.36	24.15	38.78	12.71

ตาราง ก.3 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิส
ซีล้อยจากไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายโปรลิน่า และกากกาแฟ

เวลา (นาที)	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ที่ เป็นน้ำ
ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากซีล้อยยูคาลิปตัส				
45	20.16	22.52	45.55	11.77
60	18.78	22.54	47.41	11.27
75	16.89	24.05	48.72	10.34
ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากสายโปรลิน่า				
45	39.82	16.17	8.47	35.53
60	35.79	14.11	19.33	30.78
75	34.20	22.50	14.09	29.20
ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากกากกาแฟ				
45	26.29	34.38	27.44	11.88
60	24.56	34.74	29.19	11.51
75	22.40	29.87	34.42	13.30

ตาราง ก.4 ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสซีลื้อจากไม้ยูคาลิปตัส สำหรับสายโปรลิน่า และกากกาแฟ

ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยน้ำหนัก)	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ
ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากซีลื้อยูคาลิปตัส				
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	16.73	23.57	47.65	12.04
3	19.09	22.81	46.13	11.77
5	20.19	24.33	44.93	10.56
10	18.81	22.87	49.90	8.42
ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากสายโปรลิน่า				
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	33.96	25.68	13.73	26.63
3	37.45	14.78	14.78	32.99
5	40.61	17.59	7.06	34.74
10	39.44	16.93	8.15	35.48
ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากกากกาแฟ				
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	20.71	35.50	24.02	19.76
3	21.97	30.23	36.20	11.97
5	26.50	34.38	27.66	11.46
10	21.01	28.71	39.08	11.20

ตาราง ก.5 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดย
น้ำหนักจากการไพโรไลซิสซีลียูจากไม้ยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลิน่า และกากกาแฟ

อัตราส่วนของตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ
ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากซีลียูคาลิปตัส				
0:1	18.50	22.97	46.04	12.50
0.2:0.8	19.18	22.45	44.59	13.78
0.4:0.6	17.36	23.65	47.51	11.47
0.5:0.5	20.19	24.33	44.93	10.56
0.6:0.4	15.42	23.19	46.68	14.71
0.8:0.2	17.30	22.54	49.69	10.48
1:0	18.41	21.82	50.47	9.31
ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากสาหร่ายสไปรูลิน่า				
0:1	44.88	17.49	3.96	33.66
0.2:0.8	28.86	18.27	30.70	22.16
0.4:0.6	32.14	14.29	28.26	25.32
0.5:0.5	40.61	17.59	7.06	34.74
0.6:0.4	34.10	22.09	16.26	27.55
0.8:0.2	33.15	14.32	25.03	27.51
1:0	38.82	11.79	16.69	32.70
ผลของร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากกากกาแฟ				
0:1	21.70	28.56	38.04	11.71
0.2:0.8	20.74	31.87	35.44	11.95
0.4:0.6	21.72	30.94	35.86	11.48
0.5:0.5	26.50	34.38	27.66	11.46
0.6:0.4	21.51	28.65	38.23	11.61
0.8:0.2	23.38	29.85	34.56	12.21
1:0	21.88	28.88	37.59	11.65



ภาคผนวก ข

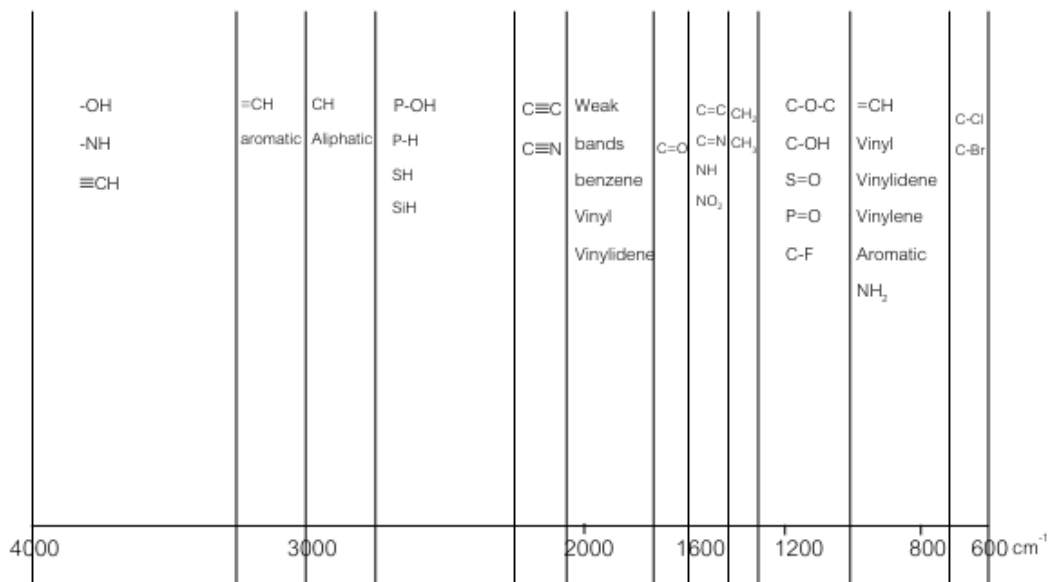
ผลการวิเคราะห์ FT-IR

การแปลความหมายของการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer จะพิจารณาแถบการดูดกลืน Infrared Spectrum เป็น 3 ช่วง คือ

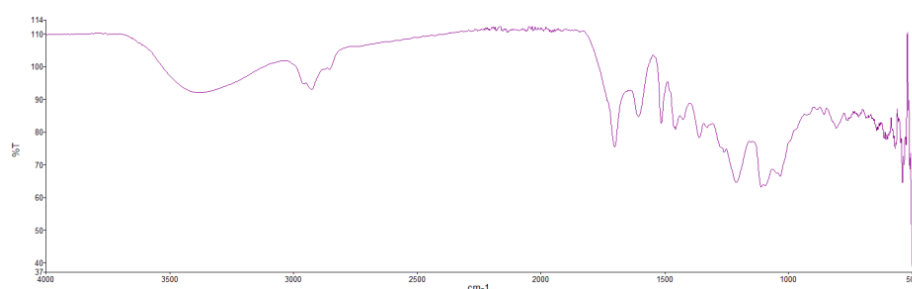
1. ย่านความถี่ $1300 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า Functional group regional เป็นย่านที่บอก ถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันใดใน ย่านนี้ จะเป็นการยืนยันว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ในโมเลกุลสารที่สนใจ แต่ทั้งนี้การแปลความหมาย ต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากโครงสร้างบางตัวอาจให้แถบดูดกลืนที่กว้างจนสังเกตเห็นได้ยาก

2. ย่านความถี่ $910 - 1300 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า Finger print regional ซึ่งแถบดูดกลืน ใน ย่านนี้มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แถบที่ปรากฏจะมีลักษณะเฉพาะตัวของโมเลกุลแต่ละชนิด อันจะมีประโยชน์ในการยืนยันว่าสาร 2 ตัวที่สงสัยเป็นสารเดียวกันหรือไม่ โดยทำการเทียบ สเปกตรัมของสารที่เตรียมในตัวอย่างชนิดเดียวกัน หากปรากฏแถบการดูดกลืนในย่านนี้ทับกันทุก ตัว แสดงว่าเป็นสารตัวเดียวกัน

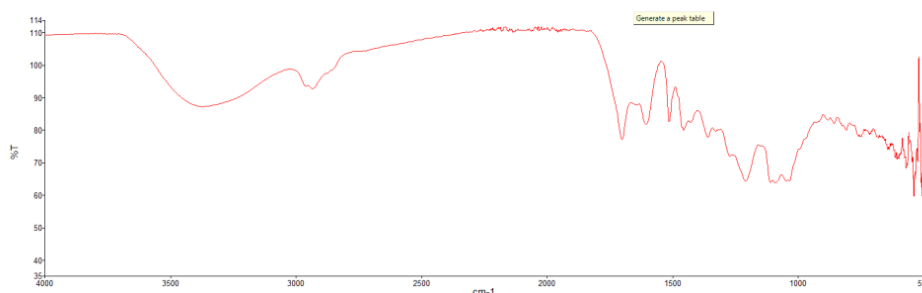
3. ย่านความถี่ $650 - 910 \text{ cm}^{-1}$ จะบ่งบอกถึงการจัดตัวของหมู่แทนที่บนวงแหวน สาร ประกอบอะโรมาติก ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนบริเวณนี้ ย่อมแสดงว่าสารที่สนใจไม่มี องค์ประกอบเป็นอะโรมาติก



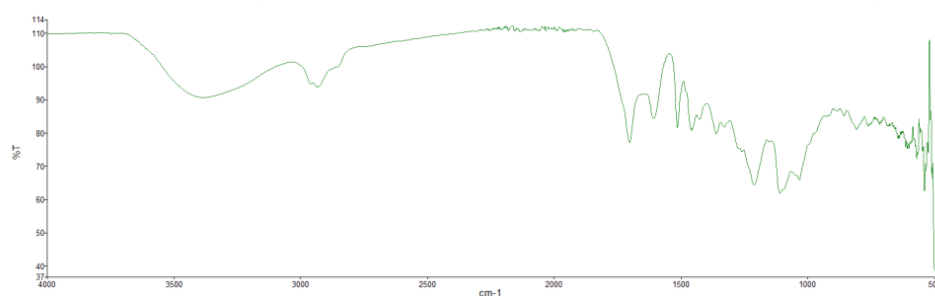
ภาพประกอบ ข.1 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ความยาวคลื่นต่างๆ



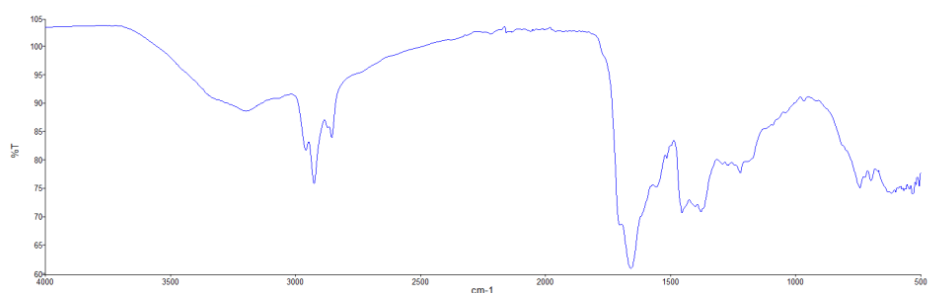
ภาพประกอบ ข.2 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากขี้เถ้ายูคาลิปตัส
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 45 นาที ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา



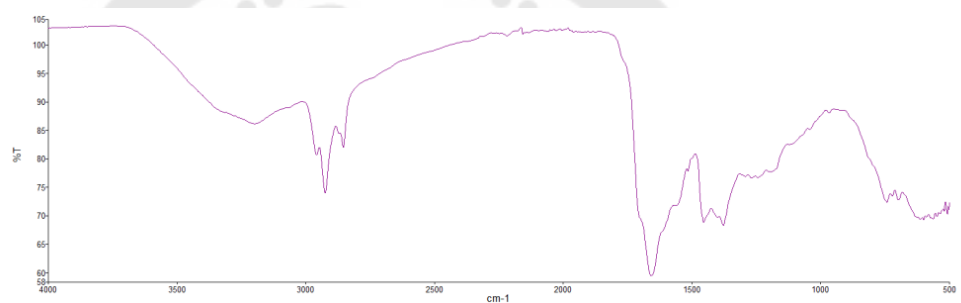
ภาพประกอบ ข.3 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากขี้เถ้ายูคาลิปตัส
ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5



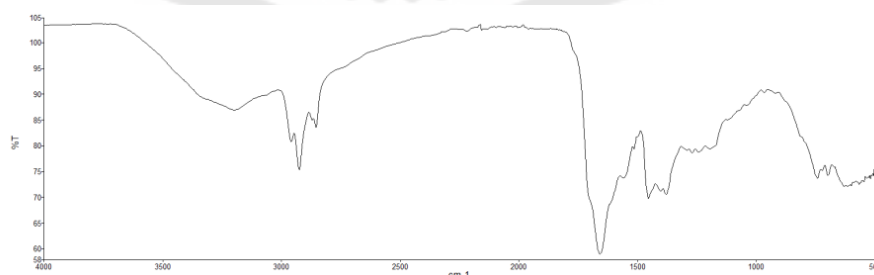
ภาพประกอบ ข.4 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากขี้เถ้ายูคาลิปตัส
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5



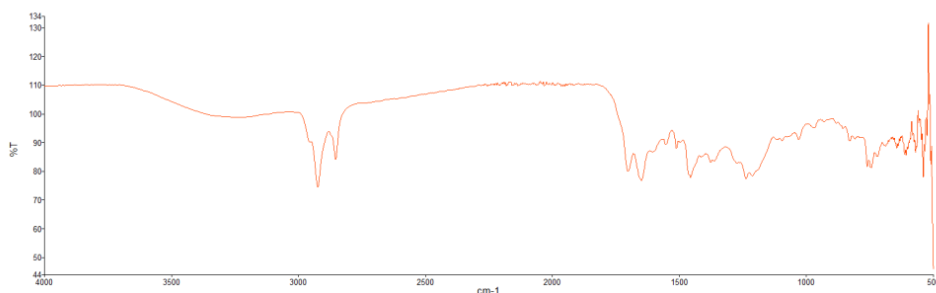
ภาพประกอบ ข.5 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายสไปรูลิน่า
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 45 นาที ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา



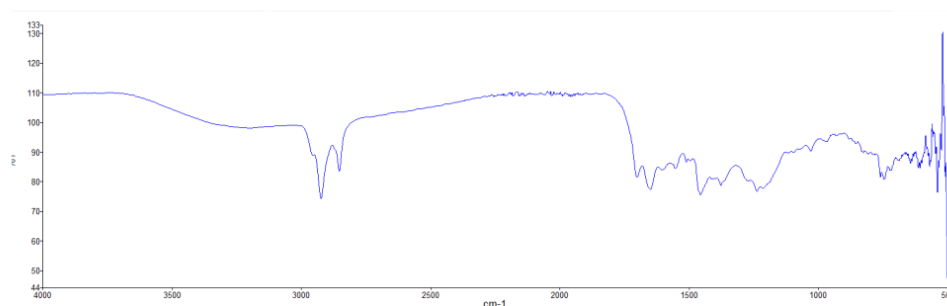
ภาพประกอบ ข.6 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายสไปรูลิน่า
ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5



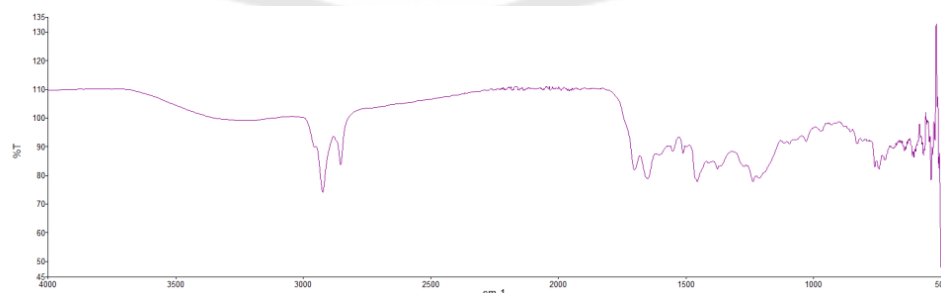
ภาพประกอบ ข.7 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายสไปรูลิน่า
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5



ภาพประกอบ ข.8 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 45 นาที ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ ข.9 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ
ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5



ภาพประกอบ ข.10 โครงสร้างของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟ
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

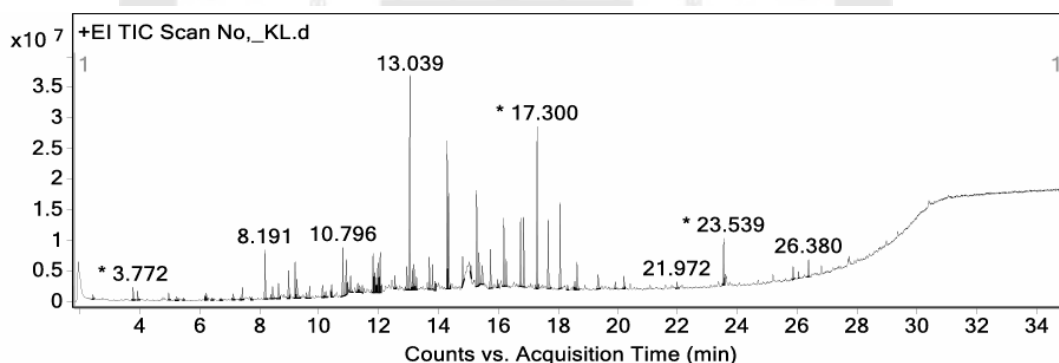


ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ GC-MS

การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสที่เสถียรยูคาลิปตัส สาหร่ายสไปรูลีนา และกากกาแฟ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่มีการต่อเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ร่วมด้วย เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยให้ผลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แม่นยำกว่าแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งในแมสสเปกโตรมิเตอร์จะมี ฐานข้อมูล (Library) เพื่อความถูกต้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐานเข้ามาเปรียบเทียบ ถือเป็น ข้อดีของเทคนิค โดยหลักการทำงานจะแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนของแก๊สโครมาโทกราฟีทำ หน้าที่แยกองค์ประกอบของสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนของสารแต่ละ ชนิดบนเฟสคงที่ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่เดียวกัน ส่วนของแมสสเปกโตรมิเตอร์ จะได้รับ สารประกอบเชิงเดี่ยวจากส่วนของแก๊สโครมาโทกราฟี และทำการกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ ในรูปของประจุเรียกว่า ไอออนโมเลกุลาร์ (Molecular ion: M⁺ or M⁻)



ภาพประกอบ ค.1 โครมาโทกราฟีองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากซีเลียมยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตาราง ค.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 ขี้เถ้าจากคอกสัตว์ที่ผ่านการหมัก 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.432	0.235	2-Propanone, 1-hydroxy-	C ₃ H ₆ O ₂
3.772	0.621	1,2-Ethanediol, monoacetate	C ₄ H ₈ O ₃
3.915	0.475	Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
4.963	0.309	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.232	0.281	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂
5.454	0.099	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃
6.184	0.167	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.221	0.426	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.423	0.151	1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.692	0.078	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.732	0.100	2,5-Furandione, 3-methyl-	C ₅ H ₄ O ₃
7.120	0.374	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.359	0.135	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.432	0.528	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.740	0.150	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
8.191	2.340	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.380	0.167	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.443	0.783	3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.639	0.956	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.978	1.482	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.197	1.471	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.250	1.548	6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂

ตาราง ค.1 (ต่อ)

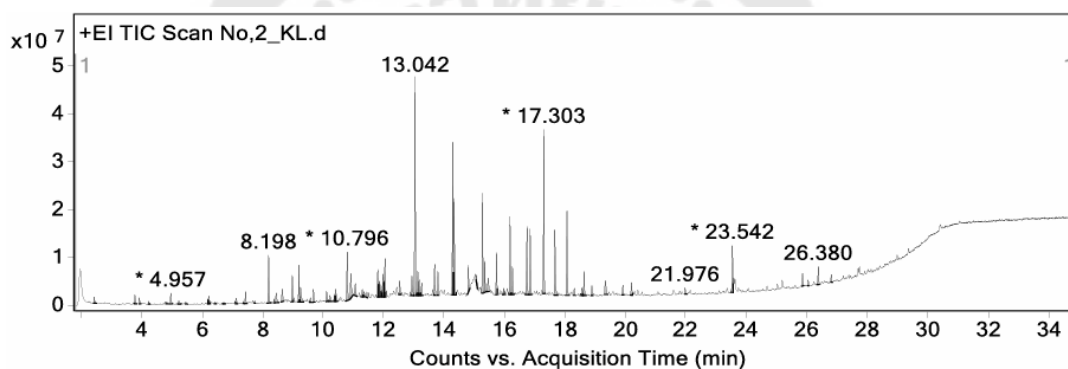
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
9.578	0.306	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.681	0.518	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
10.112	0.814	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.225		1,3-Dimethyl-3,4,5,6-tetrahydro-2(1H)- pyrimidinone	C ₆ H ₁₂ N ₂ O
10.421	0.580	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.796	2.624	2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.905	1.878	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.055	1.169	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄
11.297	0.499	1,6-Octadiene, 3-ethoxy-3,7-dimethyl-	C ₁₂ H ₂₂ O
11.360	0.448	2-Isopropoxyphenol	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.446	0.284	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.808	2.207	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.864	1.555	4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.970	2.160	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.047	2.485	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂
12.534	0.630	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂
12.933	1.451	Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.039	9.808	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.128	0.849	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.178	1.305	Phenol, 3,4-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.261	0.745	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂
13.686	1.602	Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.795	0.973	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂

ตาราง ค.1 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
13.885	0.528	1,4-Benzenediol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂
14.286	6.159	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.333	4.470	trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.804	1.357	Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃
15.076	0.349	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.272	3.847	4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.348		2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-	
	1.332	methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.733	2.100	Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.966		1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-	
	0.367	methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
16.181	2.663	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.261	1.145	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol	C ₁₁ H ₁₆ O ₃
16.745	3.112	2-Butanone, 4-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.848	2.895	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C ₉ H ₁₀ O ₄
17.300	6.853	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
17.668		Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-	
	3.392	dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄
18.066	3.732	Syringylacetone	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.315	0.240	2-Allyl-3,6-dimethoxybenzyl alcohol	C ₁₂ H ₁₆ O ₃
18.561	0.461	trans-Sinapyl alcohol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.630		1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-	
	1.444	dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
19.335	1.037	Dihydrosyringenin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄

ตาราง ค.1 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
19.911	0.302	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.203	0.639	3,5-Dimethoxy-4-hydroxycinnamaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
23.539	2.056	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
25.859	0.604	(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'-dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄
26.380	0.752	Phenol, 4,4'-methylenebis[2,6-dimethoxy-	C ₁₇ H ₂₀ O ₆



ภาพประกอบ ค.2 โคโรมาโทกราฟฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
3.772	0.462	1,2-Ethandiol, monoacetate	C ₄ H ₈ O ₃
3.918	0.319	Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
4.230	0.136	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.821	0.150	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O
4.957	0.502	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.229	0.266	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂
5.454	0.106	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃
6.184	0.154	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.214	0.497	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.423	0.101	1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.682	0.068	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.732	0.071	2,5-Furandione, dihydro-3-methylene-	C ₅ H ₄ O ₃
7.116	0.356	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.359	0.128	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.432	0.555	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.743	0.104	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
8.198	2.481	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.380	0.150	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.447	0.650	3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.643	0.721	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.981	1.405	p-Cresol	C ₇ H ₈ O

ตาราง ค.2 (ต่อ)

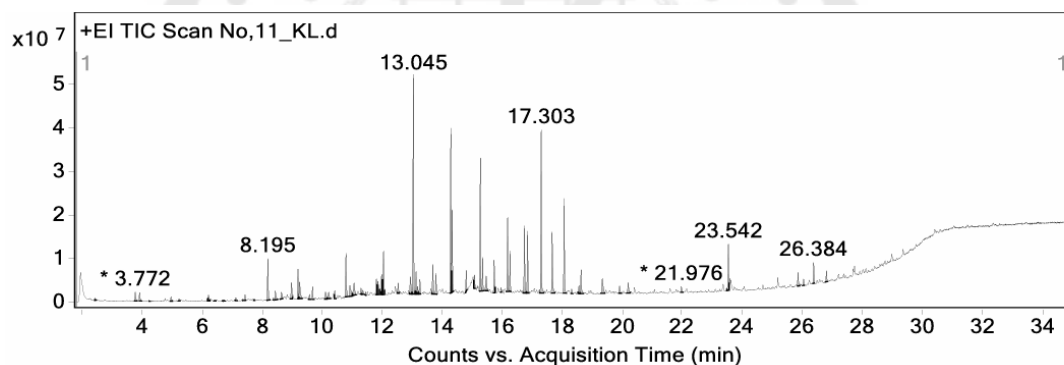
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
9.197	1.548	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.253	1.189	6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.578	0.243	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.681	0.565	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
10.112	0.699	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.228	0.433	1,3-Dimethyl-3,4,5,6-tetrahydro-2(1H)- pyrimidinone	C ₆ H ₁₂ N ₂ O
10.388	0.434	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.424	0.607	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.796	2.563	2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.915	1.712	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.065	0.861	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄
11.357	0.357	2-Isopropoxyphenol	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.449	0.221	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.808	1.568	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.864	1.372	4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.982	1.635	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.047	2.306	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂
12.534	0.663	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂
12.936	1.269	Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.042	10.716	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.132	0.990	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.178	0.874	Phenol, 3,4-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.261	0.674	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂

ตาราง ค.2 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
13.689	1.605	Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.799	0.964	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.290	6.789	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.336	4.565	trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.804	1.237	Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃
15.076	0.344	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.275	4.127	4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.352	1.270	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.737	1.941	Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.969	0.325	1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
16.185	3.330	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.264	1.267	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol	C ₁₁ H ₁₆ O ₃
16.745	3.342	2-Butanone, 4-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.848	2.964	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C ₉ H ₁₀ O ₄
17.303	7.168	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
17.668	3.358	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄
18.070	4.010	Syringylacetone	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.564	0.435	cis-Sinapyl alcohol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.634	1.261	1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.893	0.483	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂

ตาราง ค.2 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
19.334	1.033	Dihydrosyringin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄
19.915	0.467	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.203	0.689	trans-Sinapaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
21.976	0.326	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.542	2.336	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
25.863	0.603	(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'-dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄
26.380	0.880	Phenol, 4,4'-methylenebis[2,6-dimethoxy-	C ₁₇ H ₂₀ O ₆



ภาพประกอบ ค.3 โครมาโทกราฟขององค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที นาที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
3.772	0.457	1,2-Ethanediol, monoacetate	C ₄ H ₈ O ₃
3.911	0.441	Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
4.237	0.057	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.963	0.225	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
6.184	0.111	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.217	0.397	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.416	0.097	1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.682	0.060	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.728	0.080	2,5-Furandione, 3-methyl-	C ₅ H ₄ O ₃
7.123	0.205	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.355	0.087	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.432	0.263	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.740	0.089	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
8.195	2.285	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.377	0.097	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.443	0.607	3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.642	0.484	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.981	0.955	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.197	1.262	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.253	1.249	6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.578	0.274	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃

ตาราง ค.3 (ต่อ)

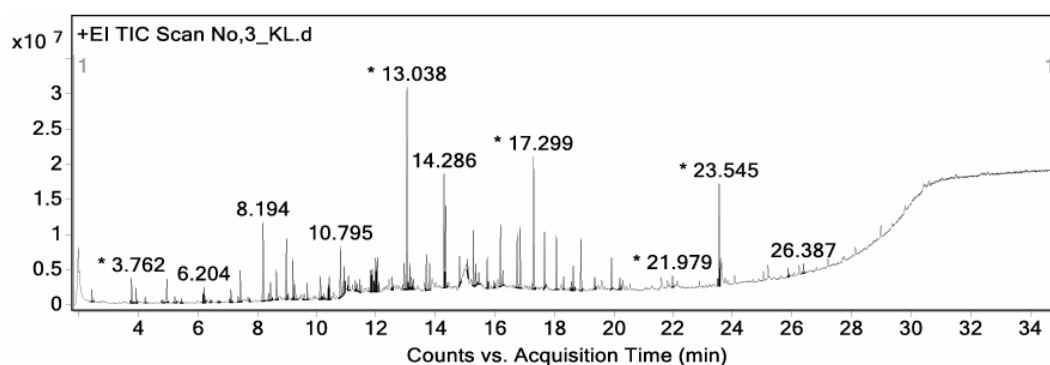
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
9.681	0.605	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
10.112	0.540	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.220	0.462	1,3-Dimethyl-3,4,5,6-tetrahydro-2(1H)- pyrimidinone	C ₆ H ₁₂ N ₂ O
10.421	0.430	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.796	2.401	2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.925	1.126	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.068	1.143	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄
11.446	0.140	2,4-Dimethoxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.811	0.918	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.861	1.252	4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.984	1.426	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.047	2.569	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂
12.534	0.545	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂
12.943	1.190	Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.045	11.970	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.132	0.989	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.178	0.462	Phenol, 3,4-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.261	0.788	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂
13.689	1.702	Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.795	0.966	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.290	7.783	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.336	3.902	trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.804	0.919	Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃

ตาราง ค.3 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
15.080	0.739	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.275	5.956	4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃
15.348		2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-	
	1.414	methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.737	1.642	Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.966		1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-	
	0.188	methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
16.185	3.246	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.264	1.677	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol	C ₁₁ H ₁₆ O ₃
16.745	3.493	2-Hydroxy-4-isopropyl-7-methoxytropone	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.848	2.951	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C ₉ H ₁₀ O ₄
17.303	7.954	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
17.668		Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-	
	3.196	dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄
18.070	4.591	Syringylacetone	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.564	0.436	trans-Sinapyl alcohol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.630		1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-	
	1.326	dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
19.341	1.302	Dihydrosyringenin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄
19.915	0.443	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.203	0.742	3,5-Dimethoxy-4-hydroxycinnamaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
21.976	0.333	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.542	2.371	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
25.863	0.717	(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'-dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄

ตาราง ค.3 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
26.048	0.285	3',4'-Dimethoxyflavonol	C ₁₇ H ₁₄ O ₅
26.384	0.986	Phenol, 4,4'-methylenebis[2,6-dimethoxy-	C ₁₇ H ₂₀ O ₆



ภาพประกอบ ค.4 โคโรมาโทกราฟฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
ซีเลื้อยยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
ซีเลื้อยยูคาลิปตัสภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
3.762	1.187	Acetic anhydride	C ₄ H ₆ O ₃
3.905	0.715	Succindialdehyde	C ₄ H ₆ O ₂
4.223	0.249	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O

ตาราง ค.4 (ต่อ)

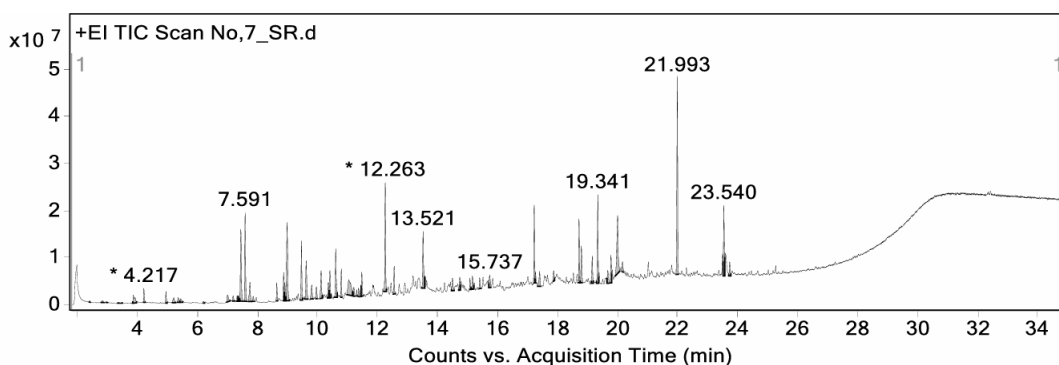
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
4.814	0.231	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O
4.946	0.936	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.218	0.412	2-Hexanone, 3-methyl-	C ₇ H ₁₄ O
5.441	0.213	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃
6.174	0.319	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.204	0.928	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂
6.413	0.196	1,2-Cyclopentanedione	C ₅ H ₆ O ₂
6.671	0.113	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
6.724	0.085	2,5-Furandione, 3-methyl-	C ₅ H ₄ O ₃
7.106	0.739	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.345	0.263	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂
7.424	1.394	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.736	0.172	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	C ₆ H ₈ O ₂
8.194	3.977	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.373	0.273	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.44	0.996	3-Methoxy-3-methylbutyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₃
8.639	1.556	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.977	3.050	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.196	1.673	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.253	1.209	6-Oxa-bicyclo[3.1.0]hexan-3-ol	C ₅ H ₈ O ₂
9.571	0.325	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃
9.674	0.673	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
10.118	1.445	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O

ตาราง ค.4 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
10.387	0.754	Benzeneethanol, 4-hydroxy-	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.42	1.142	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.795	2.641	2-Methoxy-5-methylphenol	C ₈ H ₁₀ O ₂
10.911	1.290	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.356	0.418	2-Isopropoxyphenol	C ₉ H ₁₂ O ₂
11.446	0.491	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.811	1.317	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃
11.867	1.848	4-Methoxybenzene-1,2-diol	C ₇ H ₈ O ₃
11.977	2.225	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.046	2.325	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂
12.534	0.658	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂
12.936	1.552	Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.038	8.627	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.131	1.024	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
13.178	0.709	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃
13.261	0.594	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂
13.689	1.743	Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃
13.798	1.092	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.286	4.602	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	C ₉ H ₁₂ O ₃
14.332	3.587	trans-Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
14.804	1.349	Apocynin	C ₉ H ₁₀ O ₃
15.079	0.514	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.272	2.122	4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃

ตาราง ค.4 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
15.348	0.855	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.736	1.386	Phenol, 4-ethenyl-2,6-dimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
15.968	0.293	1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
16.184	2.418	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.264	0.562	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol	C ₁₁ H ₁₆ O ₃
16.745	2.447	2-Butanone, 4-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
16.848	2.575	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C ₉ H ₁₀ O ₄
17.299	5.386	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃
17.668	2.483	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄
18.066	2.280	Syringylacetone	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.308	0.553	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
18.574	0.481	Isopropyl myristate	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
18.633	1.294	1-Propanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₄
18.892	2.441	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
19.357	0.872	Dihydrosyringenin	C ₁₁ H ₁₆ O ₄
19.924	1.325	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.203	0.747	trans-Sinapaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
21.979	0.509	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.545	4.720	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
25.866	0.418	(E)-3,3'-Dimethoxy-4,4'-dihydroxystilbene	C ₁₆ H ₁₆ O ₄



ภาพประกอบ ค.5 โครมาโทกราฟฟองค้ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 สหราชอาณาจักรดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 สหราชอาณาจักรดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.415	0.068	Benzene	C ₆ H ₆
2.840	0.186	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
2.956	0.060	2-Propanamine, N-(1-methylethylidene)-	C ₆ H ₁₃ N
3.371	0.111	2-Pentene, 4-methyl-, (E)-	C ₆ H ₁₂
3.487	0.038	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
3.849	0.060	Propanoic acid, 2-methyl-	C ₄ H ₈ O ₂
3.865	0.943	Acetamide	C ₂ H ₅ NO
4.217	0.665	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.953	0.531	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.216	0.498	Butanoic acid, 3-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂

ตาราง ค.5 (ต่อ)

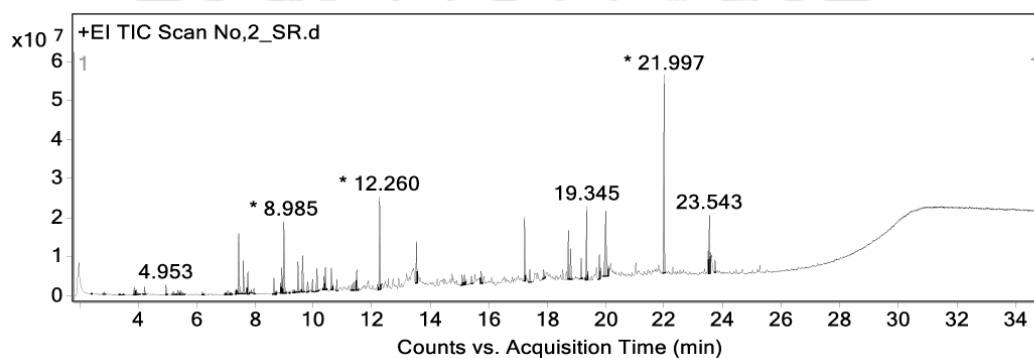
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
5.362	0.395	Butanoic acid, 2-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.445	0.354	3-Octanamine	C ₈ H ₁₉ N
6.198	0.126	Propanamide, 2-methyl-	C ₄ H ₉ NO
7.011	0.692	3-Amino-5-tert-butylpyrazole	C ₇ H ₁₃ N ₃
7.193	0.344	Pyrrole, 1-methyl-3-(1,1-dimethylethyl)-	C ₉ H ₁₅ N
7.329	0.380	1-Methyl-2-tert-butylpyrrole	C ₉ H ₁₅ N
7.379	0.436	Phenol, 4-(ethylamino)-	C ₈ H ₁₁ NO
7.449	4.672	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.591	4.341	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.750	1.434	Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
7.860	0.287	2-Aminopyridine	C ₅ H ₆ N ₂
8.646	0.796	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.875	1.200	Pyridine, 2-ethyl-4,6-dimethyl-	C ₉ H ₁₃ N
8.915	1.028	4-tert-Butylpiperidine	C ₉ H ₁₉ N
8.988	5.715	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.469	2.802	2-Ethyl-6-isopropyl pyridine	C ₁₀ H ₁₅ N
9.625	2.556	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.811	0.973	Succinimide	C ₄ H ₅ NO ₂
9.968	0.699	Benzyl nitrile	C ₈ H ₇ N
10.123	1.762	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.365	0.893	2-Methylpyrazole-3-carboxamide	C ₅ H ₇ N ₃ O
10.415	1.524	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.611	2.759	2-Ethyl-3,5-dimethylpyridine	C ₉ H ₁₃ N

ตาราง ค.5 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
10.796	1.173	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
11.042		Pyrazolo[1,5-a]pyridine, 3,3a,4,7-tetrahydro-	
	3.165	2,3,3-trimethyl-, (3aS)-	C ₁₀ H ₁₆ N ₂
11.211	0.685	Spiro[5.5]undec-8-en-1-one	C ₁₁ H ₁₆ O
11.311	0.256	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.370	0.422	1H-Pyrrole-2,5-dione, 3-ethyl-4-methyl-	C ₇ H ₉ NO ₂
11.480	1.385	Benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N
12.263	5.450	Indole	C ₈ H ₇ N
12.558	1.168	1,2,4-Cyclopentanetrione, 3-(2-pentenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃
13.521	3.592	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
14.499	0.854	1,4-Benzenediol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O ₂
14.742	0.668	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
15.084	0.485	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.163	0.952	Phenylpropanamide	C ₉ H ₁₁ NO
15.405		2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-	
	0.640	4,4,7a-trimethyl-, (R)-	C ₁₁ H ₁₆ O ₂
15.737	0.872	3-(4-Hydroxyphenyl)propionitrile	C ₉ H ₉ NO
17.221	3.234	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.400		3-Methyl-2,3,6,7,8,8a-hexahydropyrrolo[1,2-	
	0.512	a]pyrazine-1,4-dione	C ₈ H ₁₂ N ₂ O ₂
17.871	1.080	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂
18.718	0.668	Neophytadiene	C ₂₀ H ₃₈
18.794	2.722	Cyclo(L-prolyl-L-valine)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₂
19.156	2.231	Linoleyl methyl ketone	C ₁₉ H ₃₄ O

ตาราง ค.5 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
19.341	1.426	Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.673		Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	
	4.291	3-(2-methylpropyl)-	C ₁₁ H ₁₈ N ₂ O ₂
19.780		Octahydrodipyrrolo[1,2-a:1',2'-d]pyrazine-	
	0.896	5,10-dione-, (5aR,10aR) (isomer 2)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₂
20.002	1.543	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.165	5.237	9H-Pyrido[3,4-b]indole	C ₁₁ H ₈ N ₂
21.993	0.583	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.540	10.501	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.736	3.983	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO



ภาพประกอบ ค.6 โครมาโทกราฟฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 สหราชอาณาจักรไปรูดินำภาวะดำเนินการอนุมัติ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที นาที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.6 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 สหราชอาณาจักรไปรูติน่าภาวะดำเนินการอนุมัติ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

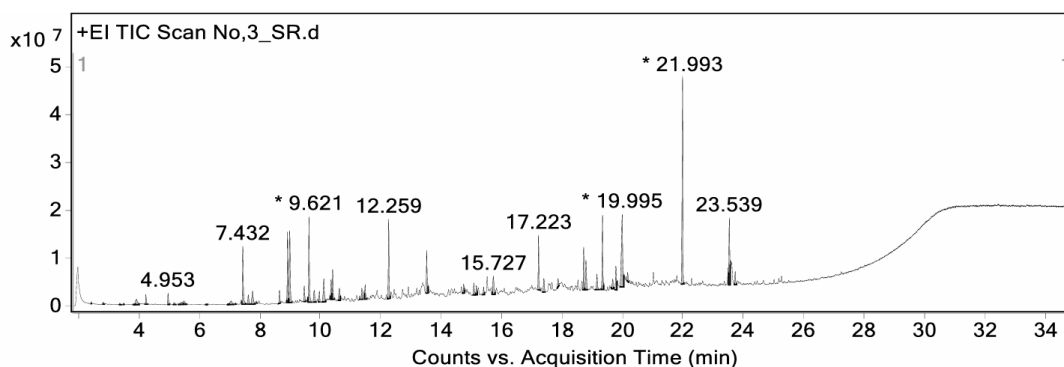
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.415	0.064	Benzene	C ₆ H ₆
2.843	0.243	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
3.351	0.091	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O
3.487	0.053	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
3.865	0.797	Acetamide	C ₂ H ₅ NO
3.938	0.708	Acetamide	C ₂ H ₅ NO
4.164	0.035	Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
4.22	0.481	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.953	0.602	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.209	0.467	Butanoic acid, 3-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.358	0.617	Butanoic acid, 2-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.451	0.699	Propanamide	C ₃ H ₇ NO
6.191	0.251	Propanamide, 2-methyl-	C ₄ H ₉ NO
6.987	0.147	Pentanoic acid, 3-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.077	0.848	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.186	0.181	Dimethyl trisulfide	C ₂ H ₆ S ₃
7.349	0.219	Pyrrole, 1-methyl-3-(1,1-dimethylethyl)-	C ₉ H ₁₅ N
7.442	5.322	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.598	2.305	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N

ตาราง ค.6 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.757	1.863	Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
7.863	0.197	2-Aminopyridine	C ₅ H ₆ N ₂
8.643	1.151	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.713	0.248	2-Amino-4-methylpyrimidine	C ₅ H ₇ N ₃
8.878	0.546	Pyridine, 2-ethyl-4,6-dimethyl-	C ₉ H ₁₃ N
8.912	1.724	2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.985	6.369	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.177	0.130	2,5-Pyrrolidinedione, 1-methyl-	C ₅ H ₇ NO ₂
9.353	0.150	2-Pyridinamine, 3-methyl-	C ₆ H ₈ N ₂
9.469	2.040	2-Ethyl-6-isopropyl pyridine	C ₁₀ H ₁₅ N
9.625	3.350	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.804	0.989	Succinimide	C ₄ H ₅ NO ₂
9.967	0.803	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.119	2.055	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.358	0.991	1-Methyl-1H-imidazole-4-carboxamide	C ₅ H ₇ N ₃ O
10.408	1.605	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
11.307	0.316	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.37	0.596	1H-Pyrrole-2,5-dione, 3-ethyl-4-methyl-	C ₇ H ₉ NO ₂
11.48	1.521	Benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N
12.26	6.485	Indole	C ₈ H ₇ N
13.52	2.902	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
15.083	0.652	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.163	0.755	Phenylpropanamide	C ₉ H ₁₁ NO

ตาราง ค.6 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
15.405	0.540	2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro- 4,4,7a-trimethyl-, (R)-	C ₁₁ H ₁₆ O ₂
15.734	1.106	3-(4-Hydroxyphenyl)propionitrile	C ₉ H ₉ NO
17.224	3.577	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.4	1.177	Uric acid	C ₅ H ₄ N ₄ O ₃
17.871	0.821	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂
18.717	2.728	Neophytadiene	C ₂₀ H ₃₈
18.797	2.497	Cyclo(L-prolyl-L-valine)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₂
19.345	4.750	Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.783	1.848	Octahydrodipyrrolo[1,2-a:1',2'-d]pyrazine- 5,10-dione-, (5aR,10aR) (isomer 1)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₂
20.002	9.153	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
21.997	15.124	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.543	4.334	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.736	0.779	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO



ภาพประกอบ ค.7 โครมาโทกราฟฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 สหราชอาณาจักรไปรัฐนิวเจอร์ซีย์ดำเนินการอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจาก
 สหราชอาณาจักรไปรัฐนิวเจอร์ซีย์ดำเนินการอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5
 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

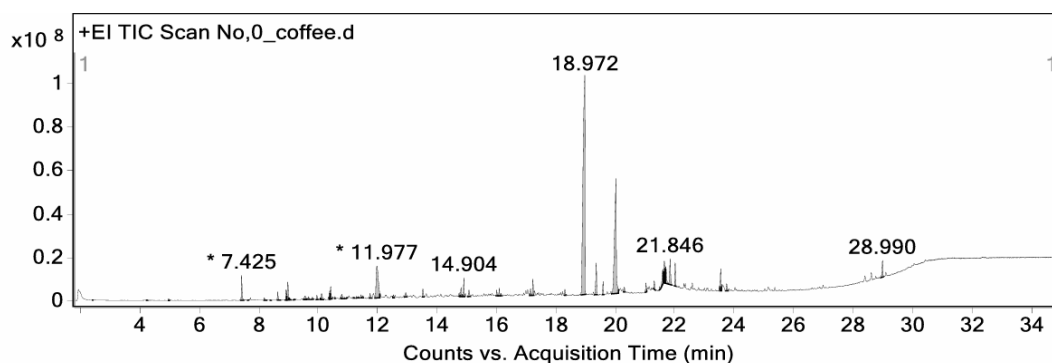
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.415	0.093	Benzene	C ₆ H ₆
2.817	0.171	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
3.354	0.172	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O
3.487	0.073	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
3.835	0.188	Propanoic acid, 2-methyl-	C ₄ H ₈ O ₂
3.912	0.913	Acetamide	C ₂ H ₅ NO
4.220	0.606	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.953	0.677	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.166	0.224	Butanoic acid, 3-methyl-	C ₅ H ₁₀ O ₂
5.325	0.132	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.421	0.364	Propanamide	C ₃ H ₇ NO

ตาราง ค.7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
5.474	0.442	3-Octanamine	C ₈ H ₁₉ N
6.211	0.130	Propanamide, 2-methyl-	C ₄ H ₉ NO
6.970	0.139	Pentanoic acid, 3-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.047	0.648	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.189	0.105	Dimethyl trisulfide	C ₂ H ₆ S ₃
7.432	4.264	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.611	0.768	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
7.757	1.576	Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
7.880	0.128	2-Aminopyridine	C ₅ H ₆ N ₂
8.646	0.849	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.911	4.143	4-tert-Butylpiperidine	C ₉ H ₁₉ N
8.984	6.055	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.465	1.111	Hexanamide	C ₆ H ₁₃ NO
9.621	5.792	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.794	1.173	Succinimide	C ₄ H ₅ NO ₂
9.966	0.622	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.112	2.237	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.358	1.444	2-Methylpyrazole-3-carboxamide	C ₅ H ₇ N ₃ O
10.404	1.990	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
11.304	0.178	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.370	0.771	1H-Pyrrole-2,5-dione, 3-ethyl-4-methyl-	C ₇ H ₉ NO ₂
11.483	1.064	Benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N
12.259	5.277	Indole	C ₈ H ₇ N

ตาราง ค.7 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
13.520	3.029	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
14.745	0.627	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
15.083	0.915	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
15.163	0.715	Phenylpropanamide	C ₉ H ₁₁ NO
15.408	0.486	2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro- 4,4,7a-trimethyl-, (R)-	C ₁₁ H ₁₆ O ₂
15.727	1.950	3-(4-Hydroxyphenyl)propionitrile	C ₉ H ₉ NO
17.223	3.044	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
17.399	1.210	3-Methyl-2,3,6,7,8,8a-hexahydropyrrolo[1,2- a]pyrazine-1,4-dione	C ₈ H ₁₂ N ₂ O ₂
17.869	0.637	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro-	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂
18.717	2.288	Neophytadiene	C ₂₀ H ₃₈
18.793	2.483	Cyclo(L-prolyl-L-valine)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₂
19.158	1.240	Linoleyl methyl ketone	C ₁₉ H ₃₄ O
19.344	4.720	Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.679	0.866	Pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, hexahydro- 3-(2-methylpropyl)-	C ₁₁ H ₁₈ N ₂ O ₂
19.782	1.884	Octahydrodipyrrolo[1,2-a:1',2'-d]pyrazine- 5,10-dione-, (5aR,10aR) (isomer 1)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₂
19.995	8.721	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
20.174	0.658	9H-Pyrido[3,4-b]indole	C ₁₁ H ₈ N ₂
21.993	14.337	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.539	4.767	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.735	0.905	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO



ภาพประกอบ ค.8 โครมาโทกราฟีของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภายใต้การอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตาราง ค.8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภายใต้การอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

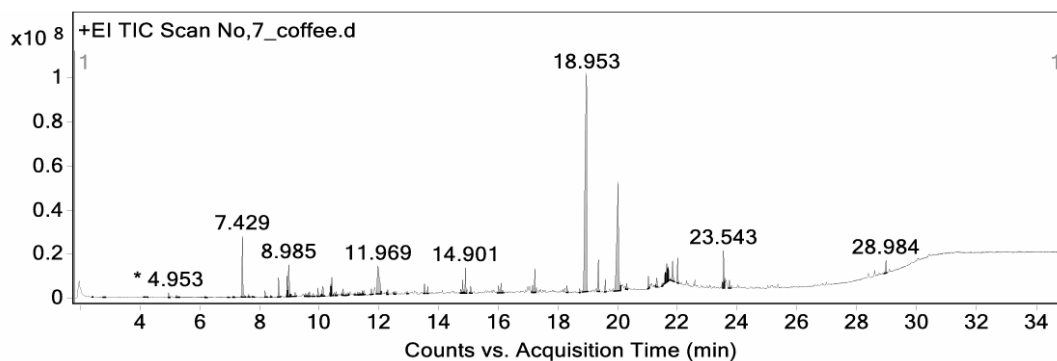
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.418	0.032	Benzene	C ₆ H ₆
4.237	0.037	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.966	0.126	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.425	1.770	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.64	0.049	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
8.188	0.207	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.387	0.020	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.639	0.597	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.921	0.674	2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.981	1.831	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.565	0.487	3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.678	0.239	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂

ตาราง ค.8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
9.807	0.211	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.956	0.317	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.079	0.093	Glutarimide	C ₅ H ₇ NO ₂
10.116	0.662	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.391	0.511	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.424	0.966	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.567	0.110	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.792	0.495	Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.892	0.085	4-Pyridinamine, 2,6-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ N ₂
10.955	0.110	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.204	0.085	Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.293	0.110	Phenol, 3-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂ O
11.350	0.114	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.446	0.195	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.509	0.191	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.748	0.442	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.977	6.774	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.950	0.483	Orcinol	C ₇ H ₈ O ₂
13.526	0.662	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
14.748	0.248	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.854	0.162	1H-Indole, 5,7-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₁ N
14.904	1.136	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
15.076	0.637	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O

ตาราง ค.8 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
16.095	0.495	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
17.226	1.003	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
18.305	0.386	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
18.972	40.588	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
19.357	2.654	2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O
19.589	0.779	Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
20.024	19.352	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
21.030	0.686	Z-8-Methyl-9-tetradecen-1-ol formate	C ₁₆ H ₃₀ O ₂
21.309	0.690	Octadecanenitrile	C ₁₈ H ₃₅ N
21.494	0.199	Methyl stearate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂
21.601	1.664	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
21.647	2.504	Oleic Acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.694	1.985	cis-Vaccenic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.846	2.484	Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
22.012	1.494	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.546	1.611	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.745	0.560	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO



ภาพประกอบ ค.9 โครมาโทกราฟฟองค้ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.415	0.056	Benzene	C ₆ H ₆
2.797	0.082	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
4.154	0.113	Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
4.227	0.087	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.953	0.467	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
5.224	0.421	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂
6.181	0.200	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂
6.957	0.118	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.127	0.195	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O
7.429	6.632	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.634	0.246	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N

ตาราง ค.9 (ต่อ)

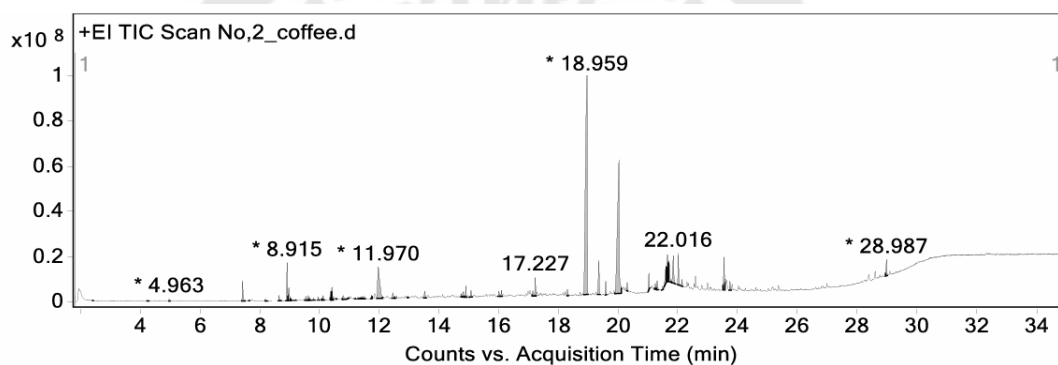
R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.780	0.164	Butanamide, 3-methyl-	C ₅ H ₁₁ NO
8.185	0.662	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.377	0.164	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O
8.640	2.079	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.925	1.848	2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.985	4.825	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.058	0.416	Heptanoic acid	C ₇ H ₁₄ O ₂
9.194	0.524	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.542	0.559	3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.625	0.323	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.675	0.539	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.798	0.498	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.957	0.898	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.080	0.164	Glutarimide	C ₅ H ₇ NO ₂
10.113	1.612	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.388	1.011	Phenol, 4-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.425	2.161	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.564	0.508	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.793	1.021	Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.889	0.175	4-Pyridinamine, 2,6-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ N ₂
10.954	0.482	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.201	0.190	Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.291	0.323	Phenol, 3-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂ O

ตาราง ค.9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
11.350	0.339	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.443	0.416	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.503	0.616	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.745	0.826	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.969	7.889	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
12.293	0.559	Naphthalene, 1-methyl-	C ₁₁ H ₁₀
12.528	0.406	2H-Inden-2-one, 1,4,5,6,7,7a-hexahydro-7a-methyl-, (S)-	C ₁₀ H ₁₄ O
13.637	0.678	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀
14.742	0.421	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.901	2.233	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
15.070	0.888	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
16.092	0.909	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
17.144	0.765	1-Heptadecene	C ₁₇ H ₃₄
17.224	2.151	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
18.299	0.652	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
19.351	3.793	2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O
19.584	1.145	Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
20.015	25.603	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
21.027	1.299	Z-8-Methyl-9-tetradecen-1-ol formate	C ₁₆ H ₃₀ O ₂
21.306	1.201	Octadecanenitrile	C ₁₈ H ₃₅ N
21.489	0.303	Methyl stearate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂
21.592	1.617	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
21.641	3.362	Oleic Acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂

ตาราง ค.9 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
21.691	2.197	cis-Vaccenic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.840	2.803	Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
22.006	2.351	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.543	3.891	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.742	0.924	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO



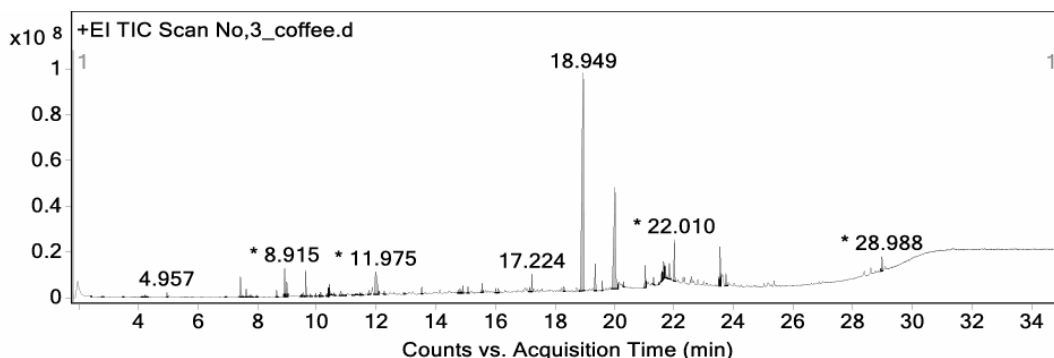
ภาพประกอบ ค.10 โครมาโทกราฟีของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภายใต้การอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.10 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.418	0.093	Benzene	C ₆ H ₆
4.233	0.104	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.963	0.359	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.422	5.048	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.637	0.139	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N
8.185	0.590	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂
8.643	0.058	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.915	1.702	1,2,3-Trimethylpiperidin-4-one	C ₈ H ₁₅ NO
8.978	1.922	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.037	0.637	Heptanoic acid	C ₇ H ₁₄ O ₂
9.193	5.222	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₂
9.552	0.266	3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.621	1.389	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.674	0.683	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	C ₇ H ₁₀ O ₂
9.797	0.602	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.956	0.903	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.073	0.266	Glutarimide	C ₅ H ₇ NO ₂
10.418	2.756	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.560	0.313	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.789	1.413	Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.889	0.243	4-Pyridinamine, 2,6-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ N ₂

ตาราง ค.10 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
10.948	0.313	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
11.201	0.243	Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.390	0.556	Patulin	C ₇ H ₆ O ₄
11.443	0.544	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.503	1.262	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.745	19.324	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.970	0.729	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂
13.520	1.679	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
14.744	0.463	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.900	1.123	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
15.073	1.413	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
16.092	1.424	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
20.303	1.957	Eicosane	C ₂₀ H ₄₂
21.242	0.567	Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄
21.488	7.144	Methyl stearate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂
21.604	5.662	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
21.654	7.086	Oleic Acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.697	4.261	cis-Vaccenic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.850	4.597	Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
22.016	1.598	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
22.139	3.728	Docosane	C ₂₂ H ₄₆
23.546	7.560	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.745	2.061	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO



ภาพประกอบ ค.11 โครมาโทกราฟีของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

ตาราง ค.11 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ของน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เวลา 45 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/H-ZSM5 และ Fe/DM ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5:0.5

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.415	0.047	Benzene	C ₆ H ₆
2.793	0.051	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂
3.490	0.031	5-Hexen-2-one	C ₆ H ₁₀ O
4.124	0.094	Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂
4.227	0.215	3-Penten-2-one, 4-methyl-	C ₆ H ₁₀ O
4.957	0.344	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
6.924	0.039	Pentanoic acid, 4-methyl-	C ₆ H ₁₂ O ₂
7.428	1.894	Phenol	C ₆ H ₆ O
7.621	0.863	Pyridine, 2,4,6-trimethyl-	C ₈ H ₁₁ N

ตาราง ค.11 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.969	0.125	Piperidine, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₅ N
8.643	0.519	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O
8.915	2.074	2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₉ N
8.985	1.765	p-Cresol	C ₇ H ₈ O
9.479	0.156	2-Ethyl-6-isopropyl pyridine	C ₁₀ H ₁₅ N
9.529	0.566	3-Pyridinol	C ₅ H ₅ NO
9.622	1.929	4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl-	C ₉ H ₁₇ NO
9.771	0.301	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
9.957	0.281	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.113	0.543	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.332	0.305	3-Pyridinol, 6-methyl-	C ₆ H ₇ NO
10.418	1.050	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.498	0.102	Octanoic acid	C ₈ H ₁₆ O ₂
10.564	0.180	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
10.617	0.074	3,4-Pyridinedimethanol, 6-methyl-	C ₈ H ₁₁ NO ₂
10.803	0.590	Phenol, 3,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O
11.198	0.086	Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.291	0.090	Phenol, 3-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂ O
11.347	0.105	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.443	0.184	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.506	0.305	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.745	0.504	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O
11.975	5.182	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂

ตาราง ค.11 (ต่อ)

R.T (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
12.256	0.324	Indole	C ₈ H ₇ N
13.520	0.621	1H-Indole, 2-methyl-	C ₉ H ₉ N
14.745	0.238	3-Ethyl-1H-indole	C ₁₀ H ₁₁ N
14.901	0.519	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
15.073	0.562	2,4-Di-tert-butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O
16.092	0.375	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
17.224	1.136	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆
18.299	0.332	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
18.949	39.050	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂
19.351	2.538	Hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N
19.587	0.652	Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂
20.015	18.131	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
21.309	0.676	Octadecanenitrile	C ₁₈ H ₃₅ N
21.595	1.031	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
21.644	2.472	Oleic Acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.694	1.457	cis-Vaccenic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
21.844	1.804	Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
22.010	3.171	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO
23.546	3.308	9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO
23.742	1.011	Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO

ประวัติผู้เขียน

