

โพไรไลซิสของจุลสารหายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PYROLYSIS OF MICRO ALGAE TO PRODUCE LIQUID FUELS IN CONTINUOUS REACTOR

Mr. Saranpong Kamsrisuk



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไฟโรไลซิสของจุลสาหร่ายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวในเครื่อง
ปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

โดย

นายศรัณร์พงศ์ คำศรีสุขต์

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณชี่ระนันท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

ศรัณร์พงศ์ คำศรีสุขต์ : ไพโรไลซิสของจุลสาหร่ายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (PYROLYSIS OF MICRO ALGAE TO PRODUCE LIQUID FUELS IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์, 101 หน้า.

งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง มีปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสตั้งแต่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.41 ถึง 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 ถึง 250 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาคระหว่างน้อยกว่า 0.15 จนถึงมากกว่า 0.84 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 42.54 โดยน้ำหนัก คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารเท่ากับ 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาคของจุลสาหร่ายอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.5 มิลลิเมตร องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีและเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น พบว่าผลการวิเคราะห์ของน้ำมันชีวภาพมีสารประกอบของอนุพันธ์ของฟีนอล คาร์บอนิกและเอไมด์เป็นส่วนใหญ่ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเชื้อเพลิงตามคาบจุดเดือดพบว่า น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบอยู่ในช่วงของดีเซลถึงน้ำมันหนักที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่สิบห้าขึ้นไป และการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายพบว่าสามารถนำน้ำมันชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5672242323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: BIO-OIL / BIOMASS / PYROLYSIS / MICROALGAE

SARANPONG KAMSRISUK: PYROLYSIS OF MICRO ALGAE TO PRODUCE LIQUID FUELS IN CONTINUOUS REACTOR. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 101 pp.

This research aims to study the parameters which are affected to the pyrolysis liquid yield and product distribution from the pyrolysis of micro algae. The experiments of pyrolysis of micro algae were carried out in continuous reactor to investigate the effects of pyrolysis parameters. The pyrolysis temperature, feed rate, nitrogen flow rate and particle size were varied in the ranges of 400 to 600 °C, 0.41 to 3.30 kilogram per hour, 50 to 250 milliliter per minute and less than 0.15 to more than 0.84 millimeter, respectively. The maximum liquid yield of 42.54% was obtained at the pyrolysis temperature at 500 °C, feed rate of 0.61 kilogram per hour, nitrogen flow rate of 200 milliliter per minute and the particle size of micro algae of 0.25-0.50 millimeter. The chemical composition of liquid products were analyzed by gas chromatography mass spectrometry and simulated distillation gas chromatography. The result shown that bio-oil composed derivatives of amide, carbonyl and phenol. The bio-oil component was obtained as the range from diesel to long residue which are containing carbon atoms more than 15 atoms. The physical chemical analysis also showed that bio-oil from micro algae could be a source of renewable fuel.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์ได้ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ช่วยแสดงความคิดเห็นในการปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณามาสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้และให้ความคิดเห็นเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องของงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีและสถานที่ให้การทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท ลีอกซ์เลย์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนในการส่งวัตถุดิบจำพวกจุลสาหร่ายให้ใช้ทำการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณทุกคนในภาควิชาเคมีเทคนิคที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาอยู่เสมอ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆด้าน ขณะที่ข้าพเจ้าทำงานวิจัยฉบับนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.5 วิธีดำเนินการทดลอง.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปีเตอร์เลียม.....	5
2.2 พลังงานทดแทน.....	7
2.3 ชีวมวล	10
2.4 องค์ประกอบของชีวมวล	14
2.5 ส่วนประกอบของชีวมวล.....	17
2.6 พลังงานจากชีวมวลที่ได้รับ.....	19
2.7 ข้อดีและข้อเสียของพลังงานชีวมวล	22
2.8 การแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานเชื้อเพลิง	24
2.9 กระบวนการไพโรไลซิส	30

2.10 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้ไฟโรไลซิส	32
2.11 ผลผลิตที่ได้จากการไฟโรไลซิส	35
2.12 น้ำมันชีวภาพ	36
2.13 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์	39
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	45
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	45
3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	49
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	49
3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
4.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของจุลสาหร่าย.....	52
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของจุลสาหร่าย.....	52
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคการ แยกสกัด.....	53
4.1.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิ เมตริก	54
4.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ	55
4.2.1 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายใน เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	55
4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น.....	57
4.2.3 ผลของอัตราการป้อนสารชีวมวลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายใน เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	58

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุล สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	60
4.2.5 ผลของขนาดอนุภาคต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายในเครื่อง ปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	61
4.3 ศึกษาอัตราส่วนของเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันชีวภาพในผลิตภัณฑ์ของเหลว	63
4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันชีวภาพ.....	64
4.4.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเฟสที่เป็นน้ำ น้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์.....	64
4.4.2 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ.....	65
4.4.3 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ.....	65
4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ	67
4.5.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตร เมทรี	67
4.5.2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์ แบบจำลองการกลั่น	70
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย อภิปรายผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการทดลอง	72
5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของจุลสาหร่าย.....	72
5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่าย	72
5.1.4 ปัจจัยของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการป้อนสารชีวมวล อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจนและขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุล สาหร่ายโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	72
5.1.5 สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันชีวภาพ.....	73
5.1.6 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ	73
5.1.6.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมท รี.....	73

5.1.6.2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลองการ กลับ.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำมันที่สะสมไว้ในเซลล์ของจุลสาหร่าย	13
ตารางที่ 2.2 ศักยภาพในการผลิตชีวมวล ปริมาณน้ำมันสะสม และพลังงานเชื้อเพลิงระหว่างพืช น้ำมันชนิดต่างและจุลสาหร่าย.....	13
ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ทางเคมีทั่วไปของตัวอย่างสารชีวมวล (ส่วนที่หนึ่ง).....	16
ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ทางเคมีทั่วไปของตัวอย่างสารชีวมวล (ส่วนที่สอง).....	17
ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ทั่วไปของสารชีวมวลชนิดตัวอย่าง ถ่านหินและพีท	18
ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ทั่วไปและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของสารชีวมวลชนิด ตัวอย่าง ถ่านหินและพีท.....	20
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของธาตุและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่างชนิดของสาร ชีวมวล ถ่านและพีท	21
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความร้อนจากการเผาไหม้ที่ได้จากการวัดและการ คำนวณของสารชีวมวล.....	22
ตารางที่ 2.9 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล.....	25
ตารางที่ 2.10 การแบ่งประเภทของกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	27
ตารางที่ 2.11 ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ.....	37
ตารางที่ 2.12 สมบัติทางกายและเคมีของน้ำมันชีวภาพ	38
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของจุลสาหร่าย	53
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของสารชีวมลฤกุลหลักในจุลสาหร่าย	53
ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก	55
ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราการป้อนสารชีวมลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก	58
ตารางที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดย น้ำหนัก.....	60
ตารางที่ 4.6 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก	62

ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์อัตราส่วนของเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันชีวภาพ63

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์และจุลสาหร่าย64

ตารางที่ 4.9 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ65

ตารางที่ 4.10 รายชื่อของสารประกอบของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่าย68

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลองการกลั่น71



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปิโตรเลียม.....	6
รูปที่ 2.2 แหล่งชีวมวลที่พบในประเทศไทย	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล	15
รูปที่ 2.4 กระบวนการแปรรูปทางเคมีและความร้อนของสารชีวมวล	24
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง.....	29
รูปที่ 2.6 แผงผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกซ์เบื้องต้น.....	30
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสารชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างเกิดการไพโรไลซิส	31
รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตคองที่แสดงในระบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Batch).....	39
รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบฟลูอิดซ์.....	41
รูปที่ 3.1 โครงร่างของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	45
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง.....	46
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	47
รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	47
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000.....	48
รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์หาค่าความร้อนรุ่น Parr 6200 Calorimeter.....	48
รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น.....	49
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักและอัตราการสูญเสียน้ำหนักของจุลสาหร่าย ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก	54
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย.....	56
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊สจากจุลสาหร่าย	57
รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการป้อนสารชีวมวลที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย.....	59
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย....	60

รูปที่ 4.6 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย	62
รูปที่ 4.7 น้ำมันชีวภาพ (ก) และเฟสที่เป็นน้ำ (ข).....	64
รูปที่ 4.8 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่าย	67
รูปที่ 4.9 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่าย.....	70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานหรือน้ำมันจากฟอสซิล (Fossil fuel) เป็นจำนวนมาก และส่งผลต่อการเติบโตทางการผลิตและการใช้พลังงานเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตจึงทำให้ปริมาณใช้น้ำมันปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ปริมาณสำรองของน้ำมันปิโตรเลียมที่มีจำนวนจำกัด [1] และมีการคาดการณ์ว่าจะหมดไปในระยะไม่นาน ในขณะที่ปัจจุบันโลกกำลังให้ความสนใจเกี่ยวกับการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการแปรผันของสภาวะภูมิอากาศ ดังนั้นจึงมีแรงผลักดันในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก (Renewable energy) เพื่อเชื้อเพลิงสะอาดขึ้นมาทดแทนพลังงานหรือน้ำมันจากฟอสซิล โดยหนึ่งในทางเลือกดังกล่าว ก็คือ การแยกสลายตัวทางความร้อนโดยใช้ชีวมวลซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โปรตีน และแป้ง ในการแปรผันขององค์ประกอบระหว่างเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสนั้นจะถูกย่อยสลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยสารชีวมวลที่เป็นของเหลือทิ้งหรือจากแหล่งเพาะปลูกทางการเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสมบูรณ์โดยการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการในการลดทุนต้นในการผลิตเชื้อเพลิง [2] นอกจากนี้สารชีวมวลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากฟอสซิล เนื่องจากสารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการปลดปล่อยแก๊สมลพิษ อาทิเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้น ซึ่งมีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

ชีวมวล (Biomass) สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบได้จากการสีข้าว เปลือกขานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ที่ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัส และสาหร่ายเป็นต้น [3] และยังมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้ง คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ ที่สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้พลังงานทางเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ถูกออกซิไดซ์ได้

สาหร่าย (Algae) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในชีวมวลที่สามารถนำมาผลิตเชื้อเพลิงเหลวทางการแยกสลายตัวด้วยความร้อนได้ ในอนาคตมีความเป็นไปได้ว่าสาหร่ายได้รับความนิยมน้อยกว่าในผลิตเชื้อเพลิงเหลว เนื่องจากสาหร่ายมีข้อดีในการเติบโตอย่างรวดเร็วและใช้พื้นที่น้อยในการเพาะเลี้ยง นอกจากนี้สาหร่ายยังมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับชีวมวลชนิดอื่นๆ

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงเหลวจากสาหร่ายมีความประสงค์ที่จะนำไปทดแทนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม แต่กระบวนการในการเอาน้ำมันออกจากสาหร่ายต้องใช้การสกัดด้วยสารละลายเฮกเซน (Hexane) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวยังเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนสูง จึงมีมูลเหตุจูงใจที่จะทำไพโรไลซิสจากสาหร่ายโดยตรง โดยมีแนวความคิดว่าน้ำมันในสาหร่ายจะถูกสลายกลายเป็นน้ำมันเบาซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแนฟทา (Naphtha) เคโรซีน (Kerosene) และดีเซล (Diesel) ส่วนเนื้อเยื่อของสาหร่ายจะถูกสลายไปเป็นน้ำมันชีวภาพ เมื่อผ่านการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันทั้งสองประเภทที่ผสมกันอยู่ และสามารถกลั่นแยกได้ในภายหลัง ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการสกัดน้ำมันออกจากเนื้อเยื่อสาหร่าย

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสาหร่าย พบว่ามีสาหร่ายสามารถผลิตเชื้อเพลิงเหลวผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่ร้อยละ 18 ถึง 45 โดยน้ำหนักของสาหร่ายที่ใช้เป็นชีวมวล ในขณะที่เทคโนโลยีของกระบวนการไพโรไลซิสทั่วไปแล้วสามารถผลิตเชื้อเพลิงของเหลวร้อยละ 40 ถึง 75 โดยน้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ และเมื่อพิจารณาจากข้อได้เปรียบของชีวมวลประเภทสาหร่ายจะทำให้สาหร่ายนั้นมีความคุ้มค่าที่จะนำมาผลิตเชื้อเพลิงเหลว

งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำจุลสาหร่าย (Micro algae) ชนิดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือสาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina platensis*: *Spirulina sp.*) เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อศึกษาตัวแปรที่จะมีผลต่อการไพโรไลซิสจุลสาหร่ายไปเป็นน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องพร้อมทั้งการอธิบายสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่มีต่อผลผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
2. ศึกษาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของจุลสาหร่าย

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุลสาหร่ายด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพสูงสุด

1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการป้อนสารชีวมวล อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนและขนาดอนุภาคที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้ รวมถึงหาภาวะ

ที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายและเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้

1.5 วิธีดำเนินการทดลอง

1. ศึกษาและค้นหาทฤษฎีและผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาทั้งในและต่างประเทศ
2. เตรียมและจัดหาจุลสาหร่าย เครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย
3. ศึกษาสมบัติของจุลสาหร่าย
 - ศึกษาอุณหภูมิในการสลายทางความร้อนของจุลสาหร่าย ด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric/Differential thermal analysis: TG/DTA)
 - วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis): ASTM D3172 D3173 D3174 และ D3175 เพื่อหาสารระเหย ความชื้น ชี้อัดและคาร์บอนคงตัว
 - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis): ASTM D3176 เพื่อหาองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยปริมาณของออกซิเจนได้จากการหาปริมาณโดยใช้วิธีผลต่าง (By difference)
 - วิเคราะห์ปริมาณของค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter): ASTM D2015
4. ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ
 - อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส
 - อัตราการป้อนสารชีวมวลเท่ากับ 0.41 0.61 1.13 2.91 และ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
 - อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 100 150 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที
 - ขนาดอนุภาคของจุลสาหร่ายเท่ากับ น้อยกว่า 0.15 0.15-0.25 0.25-0.50 0.50-0.84 และมากกว่า 0.84 มิลลิเมตร
5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ด้วย
 - วิเคราะห์หาชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography mass spectrometry: GC-MS)
 - การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพตามคาบจุดเดือดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatography: SDGC)

- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุตามมาตรฐาน ASTM D3176 เพื่อระบุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน โดยปริมาณของออกซิเจนได้จากการหาปริมาณ โดยใช้วิธีผลต่าง (By difference)
 - วิเคราะห์ปริมาณของค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D2015
 - วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพต่างๆ เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และความ เป็นกรด เป็นต้น
6. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อหาค่าการกระจาย องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์
 7. วิเคราะห์ถ่านชาร์ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุตามมาตรฐาน ASTM D3176 เพื่อหาองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน
 8. วิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อมูลที่ได้ สรุปผลงานวิจัย อภิปรายผลการทดลองและเขียน วิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

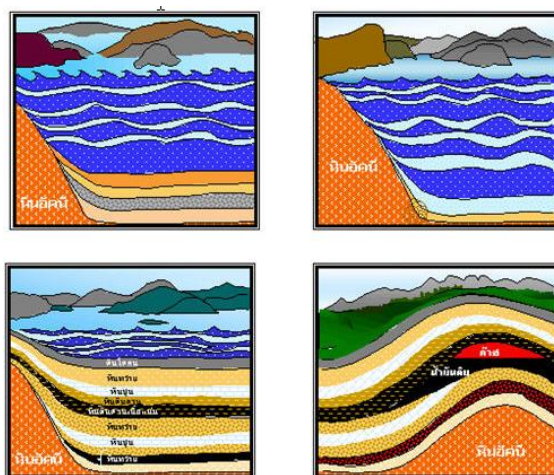
2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม [1] เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอันสลับซับซ้อน มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนและไฮโดรเจนได้จากการสลายตัวของอินทรีย์สารจำนวนมาก ทับถมกันในหินตะกอน ภายใต้ ความร้อนและความดันมหาศาล เมื่อนำมากลั่นจะได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น แก๊สหุงต้ม น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตาและยางมะตอย รวมทั้งเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ปุ๋ยเคมี ยาปราบศัตรูพืช พลาสติก และยางสังเคราะห์ เป็นต้น

แหล่งที่มาของปิโตรเลียม [4] ได้มาจากการทับถมและสลายตัวของอินทรีย์สารจากซากพืช และสัตว์กับตะกอนในชั้นกรวดทรายและโคลนตมใต้พื้นดิน เมื่อเวลาผ่านไปนับหลายล้านปีซากและ ตะกอนเหล่านี้จะจมตัวลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของผิวโลก ซากและตะกอนเหล่านั้นจึงถูกอัด แน่นด้วยความดันและความร้อนสูง ตามรูปที่ 2.1 รวมทั้งอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด จึงทำให้เกิดการสลายตัวเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติขึ้นโดยจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ ระหว่างชั้นหินที่มีรูพรุน

ปิโตรเลียมจากแหล่งต่างกันจะมีปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งปริมาณ สารประกอบของกำมะถันไนโตรเจน และออกซิเจนแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซากพืชและ สัตว์ที่เป็นต้นกำเนิดของปิโตรเลียมนั้น รวมถึงอิทธิพลของแรงที่ทับถมอยู่บนตะกอน ปิโตรเลียมที่เกิด อยู่ในชั้นหินจะมีการเคลื่อนตัวออกไปตามรอยแตกและรูพรุนของหินไปสู่ที่มีระดับความลึกเล็กน้อย กว่าแล้วสะสมตัวอยู่ในโครงสร้างหินที่มีรูพรุน มีโพรงหรือรอยแตกในเนื้อหินที่สามารถให้ปิโตรเลียม สะสมตัวอยู่ได้ ด้านบนเป็นหินตะกอนหรือหินดินดานเนื้อแน่นละเอียดปิดกั้นไม่ให้ปิโตรเลียมไหลลุด ออกไปได้

โดยแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมมีสถานะในธรรมชาติได้ 2 ชนิด คือ น้ำมันดิบ (Crude Oil) และแก๊สธรรมชาติ (Natural Gas)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปิโตรเลียม [4]

2.1.1 น้ำมันดิบ

น้ำมันดิบ [5] ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนชนิดระเหยง่ายเป็นส่วนใหญ่ แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามคุณสมบัติ และชนิดของไฮโดรคาร์บอน ที่ประกอบอยู่ คือ

1. น้ำมันดิบชนิดที่ไม่มีไขมาก (Paraffin base)
2. น้ำมันดิบชนิดที่มียางมะตอยมาก (Asphalt/Naphthenic base)
3. น้ำมันดิบชนิดผสม (Mixed base) เป็นน้ำมันดิบพื้นฐานชนิดผสมกันระหว่างชนิด

มีไขมากและชนิดที่มียางมะตอยมาก

น้ำมันดิบจะมีสีดำหรือสีน้ำตาล มีกลิ่นคล้ายน้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป เมื่อน้ำมันดิบรวมอยู่กับน้ำ น้ำมันดิบจะลอยอยู่เหนือน้ำ ภายหลังจากผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ รถยนต์ รวมทั้งเตาเผา และเตาอบต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงเครื่องบินใบพัดและน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่น เป็นน้ำมันก๊าด เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลง สีทาบ้าน น้ำมันชักเงา น้ำมันทำความสะอาดเป็นเชื้อเพลิงป้อนยาสูบ ออปติคัลและใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

โดยทั่วไปจะแบ่งหลักๆ ได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. แก๊สแห้ง (Dry gas) หมายถึงแก๊สธรรมชาติที่ไม่มีส่วนผสมของแก๊สธรรมชาติเหลว (condensate) มีแต่แก๊สมีเทนเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ทำให้มีราคาสูงกว่าแก๊สธรรมชาติชนิดอื่นๆ

2. แก๊สเปียก (Wet gas) หมายถึง แก๊สธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพวกแก๊สธรรมชาติเหลว ได้แก่ โพรเพน บิวเทน เพนเทน และเฮกเซน แก๊สเหล่านี้จะกลายเป็นของเหลวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ทางให้เกิดปัญหาในการขนส่งชนิดของแก๊สธรรมชาติ

แก๊สมีเทนใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปุ๋ย และอัดใส่ถังใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงให้กับรถโดยสารเอ็นจีวี (Natural gas for vehicles: NGV) อีเทนและโพรเพนใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas: LPG) ซึ่งประกอบด้วยโพรเพนและบิวเทน ใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม เชื้อเพลิงสำหรับรถและอุตสาหกรรมแก๊สลิควิดธรรมชาติ (Natural gas liquid: NGL) ส่งเข้าโรงกลั่นเพื่อกลั่นเป็นน้ำมันเบนซินแก๊สธรรมชาติ

2.2 พลังงานทดแทน

โดยทั่วไปหมายถึงพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล [4] เช่น ปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติซึ่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มหาศาลอันเป็นสาเหตุโลกร้อน ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่สำคัญ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ และเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น ในปี 2555 ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเพียงร้อยละ 18.2 ของพลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้า เพียงร้อยละ 1.8 โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์และเชื้อเพลิงชีวภาพ เพิ่มขึ้นร้อยละ 23 แต่พลังงานจากฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร โดยนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดั้งเดิม [5] มีอัตราลดลงร้อยละ 10 (อาจเป็นเพราะชีวมวลดังกล่าวถูกแปรรูปไปเป็นพลังงานชีวมวลไปแล้ว)

พลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นพลังงานที่ถูกทำขึ้นใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง (เช่นมวลของลมกลุ่มแรกผ่านกังหันลมไป มวลของลมกลุ่มใหม่ก็ตามมาอย่างต่อเนื่อง เป็นต้น) เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม น้ำและไฮโดรเจน เป็นต้น

ตามแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน 15 ปี ระหว่าง 2555 ถึง 2564 มีแผนที่จะให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นสัดส่วนร้อยละ 20 ของพลังงานทั้งหมด การศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นการศึกษา ค้นคว้า ทดสอบ พัฒนา และสาธิต ตลอดจนส่งเสริมและเผยแพร่พลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น พลังงานลม แสงอาทิตย์ ชีวมวลและอื่นๆ เพื่อให้มีการผลิต และการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม

2.2.1 รูปแบบของพลังงานทดแทน

ในปัจจุบันเรื่องพลังงานเป็นปัญหาใหญ่ของโลก [6] และนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อมวลมนุษยชาติมากขึ้นทุกที การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยก็เป็นอีกหนึ่งหน่วยงานที่ให้ความสำคัญในการร่วมหาหนทางแก้ไข ทำการศึกษา ค้นคว้า สืบค้น ทดลอง ติดตามเทคโนโลยีอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการนำพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีใหม่ๆ ในด้านพลังงานทดแทนเข้ามาใช้ในประเทศไทยต่อไป โดยคำนึงถึงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมซึ่งพอจะจำแนกประเภทของพลังงานทดแทนได้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำ พลังงานจากขยะ เป็นต้น

2.2.2 พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวล คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งสิ่งเหล่านี้ใช้เผาแล้วให้ความร้อนได้ เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพแบบของแข็ง และความร้อนที่ได้สามารถเอาไปปั่นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า

ทรัพยากรชีวมวล คือ มวลสารของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจเป็นป่าไม้ ผลผลิตสินค้าเกษตร และกากเหลือของทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว และของเสียอินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร ฯลฯ รวมทั้งมูลสัตว์ เช่น ไก่ หมู วัว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ทรัพยากรที่ควรนำมาพัฒนาเป็นพลังงานในอนาคต ก็คือ กากของเหลือทางการเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตร รวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ ซึ่งเป็นทรัพยากรที่หาง่ายและมีราคาถูก พลังงานชีวภาพ (อีกชื่อหนึ่งคือพลังงานชีวมวล) ใช้ วัสดุอินทรีย์เหล่านี้เป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เทคโนโลยี เช่น การสะสมแก๊ส การเปลี่ยนเป็นแก๊ส (การเปลี่ยนแปลงวัสดุแข็งเป็นแก๊ส) การเผาไหม้และการย่อยสลาย (สำหรับของเสียเปียก) เมื่อชีวมวลถูกใช้เพื่อผลิตพลังงานในวิธีการที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน จะมีบทบาทในการลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ดังนั้นเราจึงสนับสนุนพลังงานชนิดนี้

ชีวมวลสามารถใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานได้หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่มีศักยภาพสูง ได้แก่ การใช้กากของเหลือในโรงงานอุตสาหกรรมการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงในระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมกัน ซึ่งจากรายงานของบริษัทที่ปรึกษาที่เสนอต่อคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ การใช้กากของเหลือมาผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีศักยภาพสูงถึง 3,000 เมกะวัตต์

สำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ ถึงแม้จะยังมีศักยภาพน้อยกว่าการเผาโดยตรง แต่การหมักแก๊สชีวภาพก็มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาสิ่งแวดล้อมท้องถิ่น เพราะถือเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการกำจัดมูลสัตว์และน้ำเสีย จากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ อันเป็นปัญหาที่สำคัญในหลายพื้นที่ ทั้งยังลดความจำเป็นในการใช้พื้นที่จำนวนมากเพื่อการกำจัดของเสีย

พลังงานชีวภาพสามารถเป็นหนึ่งในวิธีการอันยั่งยืนในการแก้ปัญหาโลกร้อน โดยสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากขนส่งมวลชนบนถนน โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับการขนส่งที่มี

ประสิทธิภาพทางพลังงาน นอกจากนี้ การใช้พลังงานชีวมวลถือเป็นการลดปัญหาการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีผลต่ออุณหภูมิของโลกที่กำลังเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเพาะปลูกพืชหรือชีวมวลทดแทนในอัตราที่เท่ากัน พืชเหล่านั้นก็จะดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศเพื่อการเจริญเติบโต ของตนเอง ผ่านทางกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังนั้น การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลถือว่าการใช้พลังงานที่ไม่ทำให้การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโลกเพิ่มขึ้น ที่สำคัญก็คือ การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในยุคที่ 2 สามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการขนส่งได้อย่างมากในวิธีการที่ยั่งยืน เราจึงสนับสนุนการวิจัยและการพัฒนาพลังงานชีวมวลในยุคที่สอง

อุปสรรคของการพัฒนาพลังงานชีวมวลในประเทศไทย คือ ปัจจุบันในประเทศไทยมีผู้ผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลแล้วไม่ต่ำกว่า 20 รายทั้งที่เป็นโรงงานน้ำตาล (ใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง) โรงสีข้าว (ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง) คิดเป็นกำลังการผลิตรวมถึง 440 เมกะวัตต์ ปัญหาที่ทำให้การพัฒนาพลังงานชีวมวลไม่เต็มศักยภาพที่มีอยู่จึงมีข้อปัญหา ด้านเทคโนโลยี แต่ปัญหาที่สำคัญคือ ราคารับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อยจากพลังงานชีวมวล (ประมาณ 1.26 บาทต่อหน่วย) นั้นยังต่ำกว่าราคารับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายใหญ่จากเชื้อเพลิงฟอสซิล (ประมาณ 1.6 บาทต่อหน่วย) อยู่มาก ดังนั้นจึงทำให้แรงจูงใจในการลงทุนและการพัฒนาพลังงานจากชีวมวลลดลง

ประเทศไทยจำเป็นต้องมีวิสัยทัศน์และมุ่งมั่นพัฒนานโยบายพลังงานชีวมวลอย่างจริงจัง โดยในระยะสั้นควรมีการปรับราคารับซื้อไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตจากชีวมวลเพื่อจูงใจผู้ผลิต ส่วนในระยะยาวหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรจัดสรรทรัพยากรและงบประมาณเพื่อการวิจัยและพัฒนาให้มากขึ้น เพื่อสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล รวมถึงการใช้พลังงานจากชีวมวลในรูปแบบอื่นๆ อย่างจริงจัง เมื่อพิจารณาเป้าหมายที่สำคัญไปกว่า นั่นคือ การกักเก็บคาร์บอน เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเทคโนโลยีการผลิตพลังงานชีวมวล ก็คือ พลังงานชีวมวลต้องทำให้แก๊สเรือนกระจกสุทธิลดลง และต้องถูกใช้ในวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

เพื่อรักษาระดับแก๊สเรือนกระจกเอาไว้การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจะต้องไม่ก่อให้เกิดการทำลายป่าธรรมชาติหรือระบบนิเวศธรรมชาติหรือก่อให้เกิดความขัดแย้งทางสังคม ซึ่งรวมถึงความมั่นคงด้านอาหาร และพืชสำหรับพลังงานชีวมวลจะต้องปลูกในวิธีการที่ยั่งยืน

2.2.3 พลังงานจากสาหร่าย

เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันที่สกัดจากสาหร่ายกับน้ำมันจากปาล์มจะพบว่าสาหร่ายสามารถผลิตน้ำมันได้มากกว่าปาล์มถึง 100 เท่า ส่วนกากสาหร่ายที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน ยังสามารถแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ที่มีโปรตีนสูงได้อีกด้วย พลังงานจากสาหร่ายจึงเป็นอนาคตของพลังงานที่น่าสนใจและปลอดภัยกับโลกของเรา

2.3 ชีวมวล

สารอินทรีย์ [7] ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือกขานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายเศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสดกากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออกกากและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อ มะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าวสาเหล่า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ



กากใยปาล์ม



ไม้พิน



ชังข้าวโพด



เหง้ำมันสำปะหลัง



กะลามะพร้าว



แกลบ

รูปที่ 2.2 แหล่งชีวมวลที่พบในประเทศไทย [7]

แล้วเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการ สังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้น เมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง เราก็จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวลสามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อนไอน้ำหรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าโดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้นหรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง ชีวมวล มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมจะไม่ทำให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการเพาะปลูกนั้นจะมาทดแทนกันอย่างต่อเนื่องจึงทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ในการเติบโต ซึ่งเป็นการหมุนเวียนใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไม่มีการ

ปลดปล่อยเพิ่มเติม และยังมีความมุ่งหวังว่าการพัฒนาโครงการเกี่ยวกับสารชีวมวลจะสามารถสร้างรายได้และการมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วย

2.3.1 ศักยภาพของชีวมวล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลผลิต [8] และการใช้ชีวมวล พบว่าชีวมวลบางประเภทที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง และมีปริมาณคงเหลือไม่มากหรือบางชนิดขาดแคลน อาทิเช่น แกลบ กากอ้อย และเศษไม้ซึ่งชีวมวลเหล่านี้เป็นประเภทที่เกิดขึ้นที่โรงงานอุตสาหกรรม จึงทำให้ผู้ประกอบการได้หาแนวทางในการใช้กำจัดและลดต้นทุนในการผลิตของตนเองด้วยการใช้แทนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์จนปัจจุบันเชื้อเพลิงเหล่านี้มีการซื้อ-ขาย และมีกลไกด้านการค้าขายจนครบวงจรแล้วหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นชีวมวลประเภทที่เป็นเชิงพาณิชย์ ส่วนชีวมวลอีกหลายประเภทพบว่ามีปริมาณคงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการใช้งานอยู่ในขอบเขตจำกัดหรือบางประเภทยังไม่ได้ถูกนำไปใช้อย่างเป็นรูปธรรม เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย ทะลายปาล์มเปล่า ทางใบ ก้านปาล์ม และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น โดยสารชีวมวลที่มาจากสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชและสัตว์นั้นถ้าจะแบ่งตามแหล่งที่มาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

ประเภทแรก คือ ชีวมวลที่ได้จากตามโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น

1. แกลบที่เหลือทิ้งจากโรงสีข้าว
2. เศษไม้ ปีกไม้ และขี้เลื่อยที่ได้จากโรงเลื่อยไม้และโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์จากไม้
3. กะลาปาล์ม ใบปาล์ม และทะลายเปล่าได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบด้วยการสกัด
4. ชังข้าวโพดได้มาจากไซโลเก็บข้าวโพด
5. ชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาล
6. เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานผลิตแป้งมัน
7. เปลือกไม้อยูคาลิปตัสได้จากโรงงานไม้สับ

ชีวมวลประเภทนี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมทั่วไป เพราะสามารถเก็บรวบรวมได้ง่าย

ประเภทที่สอง คือ ชีวมวลได้หาได้จากตามสวน ไร่ และนาข้าว เช่น

1. ฟางข้าวได้จากการทำนาข้าว
2. ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยางพาราได้จากการทำสวนยางพารา
3. ใบอ้อยและยอดอ้อยได้จากการทำไร่อ้อย
4. เหง้ามันสำปะหลังได้จากการทำไร่มันสำปะหลัง
5. ทางปาล์มหรือใบปาล์มได้จากการทำสวนปาล์มน้ำมัน
6. ชังข้าวโพดได้จากการทำไร่ข้าวโพด

การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในกระบวนการจัดเก็บและรวบรวมที่สูง เป็นผลให้ราคาลงทุนต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่น้อยมาก ดังนั้นส่วนใหญ่ถูกเผาทิ้งอยู่ทุกปี

ประเภทที่สาม คือ ชีวมวลที่ถูกเพาะเลี้ยงขึ้นเพื่อเป็นแหล่งพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่เติบโตได้อย่างรวดเร็วและได้ทุกสภาวะเพื่อมาใช้เป็นชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงโดยตรง ซึ่งประเภทนี้เป็นที่สนใจในการพัฒนาขึ้นเพื่อทดแทนประเภทอื่นๆ เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำและใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงที่จำกัด

2.3.2 สาหร่าย

สาหร่าย [9] เป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่พบแพร่กระจายอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม สาหร่ายดำรงชีวิตอยู่ได้หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นแพลงก์ตอน (Plankton) ล่องลอยอยู่ในมวลน้ำ เรียกว่าเป็นแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) และดำรงชีวิตแบบยึดติดกับพื้นทะเลหรือบนวัสดุอื่นๆ เช่น กลุ่มของสาหร่ายหลายเซลล์ที่เรียกรวมว่า สาหร่ายทะเล (Seaweeds) นอกจากนี้ยังสามารถพบสาหร่ายในสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ในดิน หิมะ น้ำพุร้อน และสาหร่ายที่ใช้ชีวิตอยู่ร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในลักษณะความสัมพันธ์แบบพึ่งพา ตัวอย่าง ได้แก่ ไลเคน (Lichen) ซึ่งเป็นสาหร่ายที่ดำรงชีวิตอยู่ร่วมกับบราและสาหร่ายซูแซนเทลลี (Zooxanthellae) ที่อาศัยอยู่ในเนื้อเยื่อของปะการัง และหอยมือเสือ เป็นต้น โดยทั่วไปสาหร่ายแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ มหาสาหร่าย (Macro algae) และจุลสาหร่าย (Micro algae)

จุลสาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำเซลล์เดียวมีขนาดเล็กสามารถมองเห็น โครงสร้างของเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ มีคลอโรฟิลล์จึงสามารถสร้างอาหารเองได้เช่นเดียวกับ พืชทั่วไปเติบโตและพบตามแหล่งน้ำธรรมชาติต่างๆ เช่น แหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม ตลอดจนในบ่อ น้ำเสีย เป็นต้น นอกจากนี้สาหร่ายต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง เช่นเดียวกับพืชทั่วไป และสาเหตุที่จุลสาหร่ายได้รับความสนใจในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากภายในเซลล์สาหร่ายบางสายพันธุ์มีการสะสมน้ำมันไว้สูงเกือบร้อยละ 80 ของน้ำหนักแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำมันที่สะสมไว้ในเซลล์ของจุลสาหร่าย [9]

ชนิดของจุลสาหร่าย	ปริมาณของน้ำมัน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella sp.</i>	28-32
<i>Cryptothecodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16-37
<i>Dunaliella prinolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33
<i>Monollanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris sp.</i>	20-35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia sp.</i>	45-47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15-23

จุลสาหร่ายมีศักยภาพในการให้น้ำมันได้ในปริมาณสูง เพราะว่ามีระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงสั้นกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ ระยะเวลาการเพาะปลูกกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ดังตารางที่ 2.2 แล้ว หากสามารถนำมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ย่อมสามารถลดการเกิดปัญหาในการแย่งส่วนแบ่งทางอาหารหรือเกษตรกรรมจากพืชน้ำมันทั่วไปได้

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพในการผลิตชีวมวล ปริมาณน้ำมันสะสม และพลังงานเชื้อเพลิงระหว่างพืชน้ำมันชนิดต่างและจุลสาหร่าย [9]

ชนิดของพืช น้ำมัน	ชีวมวล (เมตริกตัน/ เฮกตาร์/ปี)	ปริมาณน้ำมัน (% น้ำหนักแห้ง)	ไบโอดีเซล (เมตริกตัน/ เฮกตาร์/ปี)
ถั่วเหลือง	1-2.5	20	0.2-0.5
เมล็ดเรพ	3	40	1.2
ปาล์มน้ำมัน	19	20	3.7
สบู่ดำ	7.5-10	30-50	2.2-5.3
จุลสาหร่าย	140-255	35-65	50-100

2.4 องค์ประกอบของชีวมวล

โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของชีวมวล [10] จะประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน เป็นต้น โดยปริมาณขององค์ประกอบของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของชีวมวล

2.4.1 เซลลูโลส

โดยทั่วไปพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ที่ดิกลูโคสถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะปีต้ากลูโคซิดิกมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ เมื่อ n คือ ระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยมีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหมื่น จำนวนผลลัพธ์ของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส คือ ดิกลูโคส (โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคาไรด์ (เซลลูไบโอส) และพอลิแซคคาไรด์ซึ่งมีลำดับ $n=3$ ถึง 10 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อการกัดและต่าง ดังรูป 2.3 (a) เซลลูโลส

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส

พอลิแซคคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิตคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีไซโลส (D-xylose) และดีอะราไบโนส (D-arabinose) และคาร์บอนเท่ากับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส (D-mannose) ดีกาแลคโตส (D-galactose) และดิกลูโคส (D-glucose) โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 มีจำนวนมากกว่า โมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ย คือ $(C_5H_8O_4)_n$ แต่เนื่องจากดิกิริพอลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50 ถึง 200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถสลายได้ในสารละลายเบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไป คือ ไชแลน ซึ่งประกอบด้วยไซโลสด้วยพันธะ 1,4 ดังรูป 2.3 (c) แสดงสูตรโครงสร้างของไชแลน เฮมิเซลลูโลสอื่นๆ ได้แก่ กลูโคแมนแนน (Glucomannan) ซึ่งโดยทั่วไปเซลลูโลสทั้งหมดขึ้นกับชนิดและส่วนของชีวมวล

2.4.3 ลิกนิน

สารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิทฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามมิติ โครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มีทางเข้าใจอย่างแท้จริง ดังรูป 2.3 (d) แสดงยูนิทที่ประกอบกันเป็นลิกนิน โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลชีพและสารเคมี นอกจากนั้นยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมด้วย ลิกโนเซลลูโลสและลิกนินถูกพบอย่างสากในสารชีวมวลชนิดต่างๆ และแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

2.4.4 แป้ง

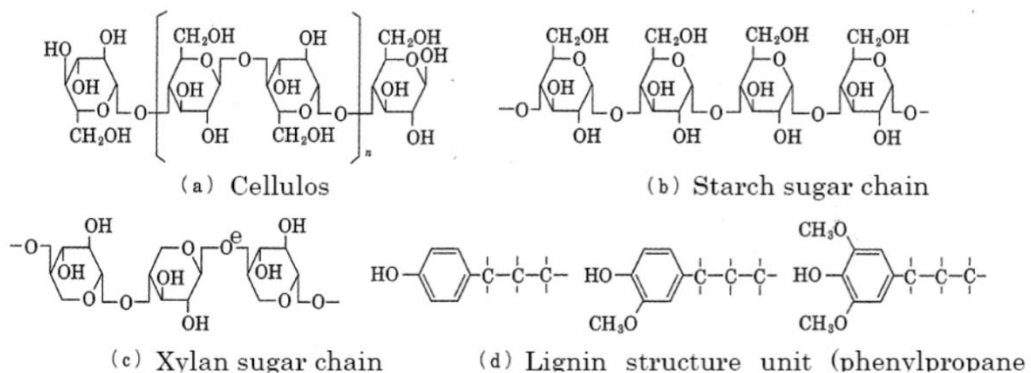
สารประกอบลักษณะคล้ายกับเซลลูโลส แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของ ดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลูโคไซด์ิก เพราะที่ความแตกต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้ง ดังในรูป 2.3 (b) จะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ของแป้ง) และบางส่วนที่ไม่ละลาย (อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 100,000 ประมาณร้อยละ 80 ถึง 90 ของแป้ง) แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น ซึ่งถือเป็นแหล่งอาหาร

2.4.5 โพรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกพอลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน โพรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวโมเลกุลทั่วไป แต่จะพบได้ในชีวมวลบางประเภทเท่านั้น

2.4.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆมีได้หลากหลายขึ้นกับชนิด สารอินทรีย์ที่มีจำนวนมาก ได้แก่ กลีเซอรอล (ตัวอย่าง เช่น น้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ) และซูโครสในอ้อยและต้นบีท ตัวอย่างอื่นๆ เช่น อัลคาลอยด์ รงควัตถุ เทอร์ปีน และซีผึ้ง ถึงแม้ว่าจะพบสารเหล่านี้ได้น้อยแต่คุณค่ามากเนื่องจากใช้เป็นส่วนผสมของยาสารชีวมวลนั้นประกอบไปด้วย สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ แต่ยังคงประกอบด้วยสารอนินทรีย์ เช่น ซีลีเนียมในจำนวนน้อย ธาตุโลหะพื้นฐานได้แก่ ซิลิกอน แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม อลูมิเนียม ซัลเฟอร์ เหล็ก โพแทสเซียม และโซเดียม สารและปริมาณขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล [10]

2.4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างชนิดของสารชีวมวล

จากตาราง 2.3 [11] แสดงตัวอย่างสารประกอบของชนิดสารชีวมวลหลัก โดยองค์ประกอบหลักของสารชีวมวลจะเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน สารชีวมวลที่ได้จากในน้ำมีองค์ประกอบที่แตกต่างออกไป ตาราง 2.3 จะแสดงสารชีวมวลจากพืช และตาราง 2.4 แสดงองค์ประกอบของกากของเสียและของเสียชีวมวลชนิดต่างๆที่มีความชื้นสูง ซึ่งในตาราง 2.3 และ 2.4 ใช้การจัดกลุ่มองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เซลลูโลสและลิกนินในตาราง 2.3 คือเส้นใยในตาราง 2.4 ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสในตาราง 2.3 คือ คาร์โบไฮเดรต ในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ทางเคมีทั่วไปของตัวอย่างสารชีวมวล (ส่วนที่หนึ่ง) [11]

องค์ประกอบ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	น้ำทะเล	น้ำจืด	ไม้	ของเสีย
	สำหรับเคลป์ ยักซ์สีน้ำตาล	ผักตบชวา	ต้นไฮบริดป๊อปลาร์	เชื้อเพลิง ขยะ (RDF)
เซลลูโลส	4.8	16.2	41.3	65.6
เฮมิเซลลูโลส	-	55.5	32.9	11.2
ลิกนิน	-	6.1	25.6	3.1
แมนนิทอล	18.7	-	-	-
ัจจินิน	14.2	-	-	-
โปรตีนดิบ	15.9	12.3	2.1	3.5
เถ้า	45.8	22.4	1.0	16.7
อื่นๆ	-	112.5	102.9	100.1

*ผลรวมทั้งหมดนั้นไม่จำเป็นต้องเท่ากับ 100 เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบถูกวัดจากวิธีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ทางเคมีทั่วไปของตัวอย่างสารชีวมวล (ส่วนที่สอง) [11]

องค์ประกอบ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	น้ำกาส่า จากการ ผลิต แอลกอฮอล์ (ข้าว)	น้ำกาส่า จากการ ผลิต แอลกอฮอล์ (มันเทศ)	กาก แป้ง	พีชน้ำ (ผักตบชวา)	กากลิ่ง ปฏิภูม
ปริมาณความชื้น	76.7	88.6	82.2	85.2	76.7
เถ้า (a)	1.3	4.4	23	19.6	16.4
(b)					
ไขมัน	8.3	1.8	0.7	2.5	12.9
โปรตีน	56.5	28.5	59.6	24.4	42.3
เส้นใยดิบ	2.1	11.9	5.4	20.6	18.1
คาร์โบไฮเดรต	33	57.8	34.3	52.5	26.7
(b)					
คาร์บอน	47.9	47.3	44.6	47.6	51.4
ไฮโดรเจน	6.7	7	7.2	6.1	7.9
ไนโตรเจน	7.5	4.2	9	3.7	6.5
ออกซิเจน	37.9	41.5	48.2	42.1	40.7

(a) อ้างอิงจากน้ำหนักแห้ง (b) อ้างอิงจากปริมาณสารอินทรีย์

2.5 ส่วนประกอบของชีวมวล

ส่วนประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. ความชื้น (Moisture) หมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่บนพื้นผิวและภายในชีวมวล โดยทั่วไปแล้วชีวมวลจะมีความชื้นที่สูง เพราะเป็นของเหลือทิ้งจากผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานโดยการเผาไหม้มันจะต้องทำให้ความชื้นของชีวมวลไม่ควรเกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) จะแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) โดยสารระเหย คือ ส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่าของสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ ขี้เถ้า (Ash) โดยทั่วไปชีวมวลจะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1 ถึง 3 โดยน้ำหนัก ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีส่วนประกอบของขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ซึ่งเป็นปัญหาในการเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนและขจัดออกพอสสมควร

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ทั่วไปของสารชีวมวลชนิดตัวอย่าง ถ่านหินและพีท [12]

ประเภท	สารชีวมวล	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สารอินทรีย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้า** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ของเสีย	มูลโค	20-70	76.5	23.5
	กากชีวภาพ	90-97	76.5	23.5
	เชื้อเพลิงขยะ	15-30	86.1	13.9
	ขี้เลื่อย	15-60	99.0	1.0
พีชเฮอร์บาเซียส	ข้าวฟ่างหวาน	20-70	91.0	9.0
	หญ้าสวิตช์	30-70	89.9	10.1
พีชน้ำ	สาหร่ายเคลป์ ยักซ์สีน้ำตาล	85-97	54.2	45.8
	ผักตบชวา	85-97	77.3	22.7
พีชไม้	ยูคาลิปตัส	30-60	97.6	2.4
	ไฮบริดปีปอลาร์	30-60	99.0	1.0
	ไซคามอร์	30-60	99.8	0.2
อนุพันธ์	กระดาษ	3-13	94.0	6.0
	เปลือกสน	5-30	97.1	2.9
	ฟางข้าว	5-15	80.8	19.2
ถ่านหิน	อิลลินอยส์ บิทูมินัส (Illinois bituminous)	5-10	91.3	8.7
พีท	ต้นกก	70-90	92.3	7.7

**ปริมาณเถ้าที่หาได้จากน้ำหนักของสารที่เหลืออยู่ (โลหะออกไซด์) หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส

2.6 พลังงานจากชีวมวลที่ได้รับ

พลังงานชีวมวลที่ได้รับ คือ ค่าความร้อนที่ได้จากของเหลือใช้ทางการเกษตร อาทิเช่น ไม้พิน แกลบ กากอ้อย เศษไม้และเศษหญ้า ซึ่งสิ่งเหล่านี้ใช้เผาแล้วให้ความร้อนได้ เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพแบบของแข็ง และความร้อนที่ได้สามารถเอาไปปั่นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า

2.6.1 ตัวบ่งชี้ปริมาณความจุพลังงานชีวมวล

เพื่อที่จะจัดตั้งระบบพลังงานชีวมวล ต้องหาปริมาณพลังงานของสารชีวมวลที่ถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณความจุพลังงานของสารชีวมวล ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดจากเมื่อสารถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์หรือเรียกว่าความร้อนของการเผาไหม้ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้นั้นสามารถหาค่าได้จากอัตราส่วนขององค์ประกอบและอัตราส่วนของธาตุ เช่น ปริมาณคาร์บอนในสารชีวมวล

1. ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูง-ต่ำ

สารชีวมวลประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน เมื่อถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ จะให้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้จะมีปริมาณความร้อนแฝงมากและความร้อนจะถูกปล่อยออกมาเมื่อเกิดการควบแน่น ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ที่รวมค่าความร้อนแฝง คือ ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ขั้นสูง ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ที่หักค่าความร้อนแฝงออก คือ ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ขั้นต่ำ

2. ความร้อนพร้อมใช้

ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (Q_0) [12] คือ ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ต่อยูนิตสารภายใต้สภาวะมาตรฐาน ความจริงแล้วสารชีวมวลนั้นประกอบได้ด้วยความชื้นและขี้เถ้าจำนวนมาก ซึ่งถูกนำมาพิจารณาเมื่อใช้ผลิตพลังงาน การประมาณค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำสุดนั้นไม่พอสำหรับใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าสารชีวมวลในสภาวะธรรมชาติจะเป็นเช่นนั้นในการเผาไหม้ พลังงานที่เพิ่มอุณหภูมิแก่อากาศที่อยู่แวดล้อมเพื่อรักษาการเกิดเปลวไฟและพลังงานดูดความร้อนในขี้เถ้าถูกนำมาคิดด้วย ดังนั้นความร้อนพร้อมใช้ถูกแสดงโดยสมการดังต่อไปนี้

ความร้อนพร้อมใช้ $Q = Q_0(1-w) - 1000W - [\text{ความร้อนที่ถูกดูดในอากาศ}] - [\text{ความร้อนที่ถูกดูดในขี้เถ้า}]$
 หมายเหตุ (w: ปริมาณความชื้น)

2.6.2 ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารชีวมวลชนิดต่าง

จากตาราง 2.6 จะแสดงข้อมูลสำหรับปริมาณความชื้น ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณขี้เถ้าและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของชนิดตัวอย่างของสารชีวมวล

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ทั่วไปและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของสารชีวมวลชนิด
ตัวอย่าง ถ่านหินและพีท [12]

ประเภท	สารชีวมวล	ความชื้น (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	สารอินทรีย์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	เถ้า** (ร้อยละ โดย น้ำหนัก)	ค่าความร้อนที่ได้ จากการเผาไหม้ (เมกะจูลต่อกรัม)
ของเสี้ยว	มูลโค	20-70	76.5	23.5	13.4
	กากชีวภาพ	90-97	76.5	23.5	18.3
	เชื้อเพลิงขยะ	15-30	86.1	13.9	12.7
	ขี้เลื่อย	15-60	99.0	1.0	20.5
พีชเฮอร์ บาเซียส	ข้าวฟ่างหวาน	20-70	91.0	9.0	17.6
	หญ้าสวิตช์	30-70	89.9	10.1	18.0
พีชน้ำ	สาหร่ายเคลป์ ยักซ์สีน้ำตาล	85-97	54.2	45.8	10.3
	ผักตบชวา	85-97	77.3	22.7	16.0
พีชไม้	ยูคาลิปตัส	30-60	97.6	2.4	18.7
	ไฮบริดปีอปลาร์	30-60	99.0	1.0	19.5
	ไซคามอร์	30-60	99.8	0.2	21.0
อนุพันธ์	กระดาษ	3-13	94.0	6.0	17.6
	เปลือกสน	5-30	97.1	2.9	20.1
	ฟางข้าว	5-15	80.8	19.2	15.2
ถ่านหิน	อิลลินอส บีทู มินัส	5-10	91.3	8.7	28.3
พีท	ต้นกก	70-90	92.3	7.7	20.8

*ปริมาณความชื้นสะสมหาได้จากน้ำหนักที่หายไปหลังจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
ภายใต้ความดันบรรยากาศ

**ปริมาณเถ้าที่หาได้จากน้ำหนักของสารที่เหลืออยู่ (โลหะออกไซด์) หลังจากการให้ความร้อนที่
อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส

ปริมาณความชื้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดโดยขึ้นกับชนิดของสารชีวมวล ตัวอย่างเช่น ร้อยละ 3 ในกระดาษและร้อยละ 98 ในกากของเสีย สารชีวมวลแทบจะทุกชนิดประกอบด้วยน้ำมากกว่า 2 ใน 3 ทำให้ความร้อนพร้อมใช้มีค่าติดลบ ดังนั้นแม้ว่าสารชีวมวลนั้นจะมีค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูงแต่ถ้าหากมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่จำนวนมาก ไม่เหมาะสมในการนำมาเผาไหม้ เช่น ผักตบชวาและสิ่งปฏิกูล มีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงเมื่อถูกอบแห้ง แต่มีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 95 จากการสุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมต่อการเผาไหม้

สารอินทรีย์ทั้งหมดที่เหลือจากการนำชี้่ไถ่ออกจากสารอบแห้งทั้งหมด เนื่องจากค่าพลังงานของชี้่ไถ่เท่ากับศูนย์ สารอินทรีย์จำนวนมากหมายถึงค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จำนวนมากเช่นกัน สารอินทรีย์นั้นมีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่างกันขึ้นกับชนิดและอัตราส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ตาราง 2.7 แสดงผลของการวิเคราะห์ธาตุและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของชนิดของสารชีวมวลและเชื้อเพลิงอินทรีย์อื่นๆ เพราะสารชีวมวลมีออกซิเจนมากและมีคาร์บอนและไฮโดรเจนน้อยกว่าถ่านหินและปิโตรเลียม สารชีวมวลนั้นมีค่าความร้อนจากการเผาไหม้ต่อยูนิตน้ำหนักน้อยกว่า สารชีวมวลประเภทต้นไม้และพืชนั้นมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 45 ถึง 50 และปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 5 ถึง 6 มีอัตราส่วนโมลาร์ของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนประมาณ 2 เป็นผลมาจากสารประกอบหลักซึ่งได้แก่ เซลลูโลสและลิกนิน

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของธาตุและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่างชนิดของสารชีวมวล ถ่านและพืช [12]

องค์ประกอบของธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	เซลลูโลส	สน	สำหรับ เคลป์ ยักษ์	ผักตบชวา	ของเสีย ปศุสัตว์	อาร์ ดี เอฟ	พีท
คาร์บอน	44.44	51.8	27.65	41.1	35.1	41.2	52.8
ไฮโดรเจน	6.22	6.3	3.73	5.29	5.3	5.29	5.45
ออกซิเจน	49.34	41.3	28.16	28.84	33.2	28.8	31.2
ไนโตรเจน	-	0.1	1.22	1.96	2.5	1.96	2.54
ซัลเฟอร์	-	0	0.34	0.41	0.4	0.41	0.23
เถ้า	-	0.5	38.9	22.4	23.5	22.4	7.74
ค่าความร้อน	17.51	21.2	10.01	16.0	13.37	16.0	20.8

ปริมาณความชื้นสะสมและคุณสมบัติอื่นๆ ผลจากการวิเคราะห์ธาตุนั้นมาจากสถานะแห้ง

2.6.3 การประมาณค่าความร้อนจากการเผาไหม้โดยการคำนวณ

ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของชนิดสารชีวมวลที่แสดงในตาราง 2.6 และ 2.7 ความพยายามในการประมาณค่าโดยการคำนวณข้อมูล เช่น ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สาร มีหลายสมการที่ถูกละเลยและหนึ่งในนั้น คือ

ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงสุด (High heating value: HHV) [เมกะจูลต่อกิโลกรัมแห้ง] = 0.4571(ร้อยละของคาร์บอนแห้งพื้นฐาน) - 2.70

ในตาราง 2.8 จะเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากเผาไหม้ที่ได้จากการคำนวณตามสมการและได้จากการวัดค่า ยกเว้นกากของเสีย ของแข็งชีวมวล ผลนั้นจะใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความร้อนจากการเผาไหม้ที่ได้จากการวัดและการคำนวณของสารชีวมวล [12]

วัตถุดิบชีวมวล	ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงสุดจากการวัด (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จากการคำนวณ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
เซลลูโลส	17.51	17.61	+0.59
สน	21.24	20.98	-1.23
สาหร่ายเคลป์ยักษ์สีน้ำตาล	10.01	9.94	-0.70
ผักตบชวา	16.00	16.09	+0.54
มูลโค	13.37	13.34	-0.19
กากชีวภาพ	19.86	17.3	-12.9
บิทูเมน	28.28	28.84	+1.98

2.7 ข้อดีและข้อเสียของพลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวลถือได้ว่าถูกนำมาใช้มากถึงประมาณร้อยละ 15 พลังงานของโลก เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์ และพืช ในประเทศอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลถูกนำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรม ในขณะที่ส่วนใหญ่ของประเทศกำลังพัฒนานั้นจะนำชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เช่น การหุงต้ม เป็นต้น

สรุปข้อดีการใช้พลังงานจากชีวมวล

1. กระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันเตาและถ่านหินก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน แต่ในส่วนของชีวมวลนั้นใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงและเติบโตจึงถือได้ว่าการเผาชีวมวลไม่ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกเพราะชีวมวลสามารถตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมาใช้ใหม่ได้อย่างเท่ากับที่ปล่อยออกไปหลังจากการเผาไหม้

2. การย่อยสลายเศษซากอาหารหรือชีวมวลตามธรรมชาติจะทำให้เกิดแก๊สมีเทน การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์ก่อนเกิดการย่อยสลายจึงถือได้ว่าเป็นการลดปล่อยแก๊สมีเทน

3. ชีวมวลบางชนิดจะมีส่วนประกอบของกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.1 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด เพราะจะทำให้ไม่เกิดการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ (SO₂) ขณะที่น้ำมันเตาและถ่านหินมีปริมาณกำมะถันสูงถึงประมาณร้อยละ 2 และร้อยละ 0.3 ถึง 4.0 ตามลำดับ ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหินทำให้เมื่อเกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสาเหตุของฝนกรด

4. ขี้เถ้าของชีวมวลมีสถานะเป็นเบส ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเพาะปลูกหรือการปรับสภาพดินที่เป็นกรด ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

5. ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงและพลังงานจากต่างประเทศช่วยลดค่าใช้จ่ายหรือเงินตราที่ออกจากต่างประเทศ

6. สามารถแปรรูปชีวมวลเป็นปุ๋ยผ่านกระบวนการหมักได้

7. วัสดุดิบได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น การนำเศษไม้โรงเลื่อยมาย่อยและอัดเป็นแผ่นปาร์ติเคิลบอร์ดและแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

สรุปข้อเสียการใช้พลังงานจากชีวมวล

1. ความแตกต่างของมวลน้ำหนักของชีวมวลขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของชีวมวล และส่วนใหญ่นั้นจะมีน้ำหนักที่ค่อนข้างเบาและมีขนาดเล็กยากต่อการขนส่งและต้องมีการควบคุมการแพร่กระจายในอากาศ

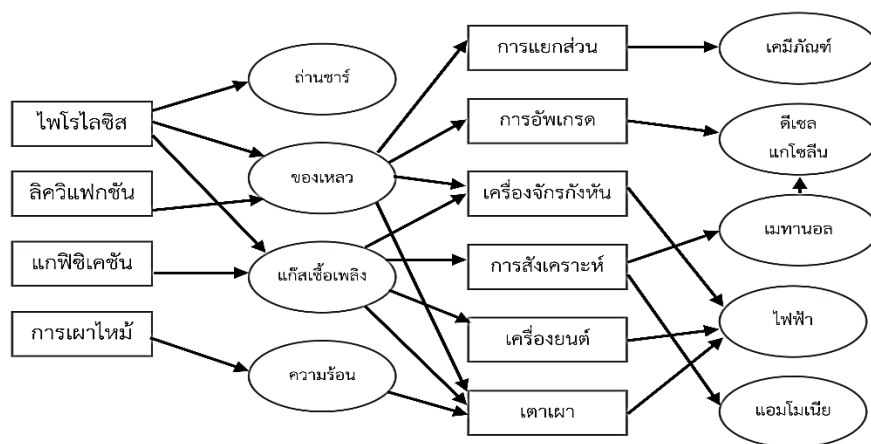
2. ชีวมวลมีความชื้นที่สูงจึงมีการออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่อยไอเสียขนาดใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่ม ทำให้เกิดการลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูงเกินไปจะทำให้ได้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าความร้อนที่ต่ำอาจทำให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพต่ำ

3. ชีวมวลมีส่วนประกอบของธาตุโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการกัดกร่อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้

2.8 การแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันนั้นประเทศไทยมีการผลิตพลังงานทั้งในรูปแบบความร้อนและไฟฟ้า โดยการใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบนี้จะมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงระดับเชิงพาณิชย์ โดยการแปรรูปสารชีวมวลเป็นพลังงานผ่านกระบวนการทางเคมีและความร้อนจะมีระบบหลักๆอยู่ 5 ระบบ ก็คือ ระบบของเผาไหม้โดยตรง (Direct fired) ระบบของเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงสองชนิดขึ้นไปหรือการเผาไหม้ร่วม (Co firing) แก๊สซิเคชันหรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification) ไฮโดรเทอร์มอลลิควิแฟกชัน (Hydrothermal liquefaction) และไพโรไลซิส (Pyrolysis)

โดยทั่วไปจะมีข้อแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและภาวะในกระบวนการผลิตของระบบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.4 กระบวนการแปรรูปทางเคมีและความร้อนของสารชีวมวล [12]

2.8.1 การเผาไหม้โดยตรง

กระบวนการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนร่วมการเกิดความร้อนสูงและแสงเป็นปรากฏการณ์ที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เมื่อใช้สารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีความร้อนเกิดขึ้นโดยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ที่เผาไหม้ได้ และไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสารชีวมวลทำปฏิกิริยาสันดาปกับออกซิเจนหรือที่เรียกว่าการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในเฟสแก๊ส ปฏิกิริยาบนพื้นผิว หรือทั้งคู่ตามด้วยกระบวนการหลอมเหลว การระเหยและไพโรไลซิส ในปฏิกิริยาการเผาไหม้จึงเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อน เช่น การระเหย การแพร่ การผสม การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีและการเกิดเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงเผาโดยตรงในเฟสแก๊สในการเผาไหม้เป็นแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (Premix combustion) และการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงแพร่กระจาย (Diffuse combustion) เชื้อเพลิงของเหลวจะถูกเผาเหมือนเป็นแก๊สเผาไหม้ได้ในเฟสแก๊สหลังจากการระเหยที่พื้นผิว ซึ่งเรียกว่าการเผาแบบระเหย น้ำมันจะถูกเผาในการเผาไหม้

แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) แต่การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) ยังดำเนินต่อไปซึ่งจะสลายเชื้อเพลิงบางส่วนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยารูปแบบการเผาไหม้

รูปแบบการเผาไหม้ของการเผาไหม้สารชีวมวลโดยตรงซึ่งเป็นของแข็งนั้น ได้แก่ การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) การเผาไหม้ที่พื้นผิว (Surface combustion) การเผาไหม้แบบช้าๆ ที่ไม่มีไฟแต่มีควัน (Smoldering combustion) ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหยนั้นเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐานซึ่งโครงสร้างโมเลกุลจะมีจุดหลอมเหลวต่ำและระเหยได้โดยการให้ความร้อนและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสแก๊สและเกิดการเผาไหม้ ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัวแก๊ส (แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สชีวภาพ ไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวโดยการให้ความร้อน

ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสแก๊ส และเกิดเปลวไฟและเกิดการเผาไหม้ โดยปกติถ่านชาร์นั้นจะเหลือหลังจากการเผาไหม้ชนิดนี้และถูกเผาด้วยการเผาไหม้ที่พื้นผิว การเผาไหม้ที่พื้นผิวเกิดในกรณีของสารองค์ประกอบที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่มีสารระเหยได้สะสมอยู่เล็กน้อยเท่านั้น เช่น ถ่านหิน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำจะแพร่เข้าไปในรูที่มีอยู่ในหรือพื้นผิวของของแข็งของสารนั้นและเกิดการเผาไหม้โดยปฏิกิริยาที่พื้นผิว การเผาไหม้ช้าๆแบบไม่มีไฟแต่มีควันนั้นเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของสารระเหยของเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้นั้น เช่น ไม้ ถ้าการติดไฟทำให้เกิดควันหรืออุณหภูมินั้นเกินกว่าจุดติดไฟการเผาไหม้ การเผาไหม้ที่มีไฟจะเกิดขึ้น รูปแบบการเผาไหม้หลักในการเผาไหม้ของสารชีวมวลโดยตรงในอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเผาแบบเชื้อเพลิงสลายตัวและการเผาไหม้ที่พื้นผิว โดยชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวลจะแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล [13]

วิธีการเผาไหม้	ชนิดของการเผาไหม้	ลักษณะสำคัญ
การเผาไหม้แบบนิ่ง (Fixed bed)	ตะกรับวางแนวนอน/ เอียงตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้า	ตะกรับเป็นชั้นหรือเป็นแบบเอียงชั้น การเผาไหม้ของสารชีวมวลเป็นการเผาไหม้พื้นผิว ใช้ในเตาเผาแบบที่ละชุดขนาดเล็กสำหรับสารชีวมวลที่มีขี้เถ้าเล็กน้อย

ตารางที่ 2.9 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล (ต่อ) [13]

วิธีการเผาไหม้	ชนิดของการเผาไหม้	ลักษณะสำคัญ
การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่ (Moving bed)	ตะกรับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ตะกรับเคลื่อนที่ไปข้างหลัง ตะกรับแบบเป็นชั้น ตะแกรงคล้ายบานเก็ດ	ตะกรับจะค่อยๆเคลื่อนที่และถูกแบ่งเป็นโซนเผาไหม้และโซนหลังจากเผาไหม้ เนื่องจากมีการปล่อยชี้เถ้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตะกรับมีขนาดใหญ่ เพื่อลดการกีดขวางของชี้เถ้าสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้ตั้งแต่เป็นเศษเล็กๆจนถึงเป็นขนาดบดลือก
การเผาไหม้แบบฟลูอิดाइเซด (Fluidized bed)	การเผาไหม้ระบบฟลูอิดाइเซดแบบพองอากาศ การเผาไหม้ระบบระบบฟลูอิดाइเซดแบบหมุนเวียน	ใช้ทรายเป็นเบด โดยให้ทรายและเชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาหลอมนั้นอยู่ในสภาวะเดือดที่มีความดันของอากาศในการเผาไหม้สูงและเกิดการเผาไหม้ผ่านความร้อนที่กักเก็บในทรายและผลการส่งผ่านความร้อนของทรายเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและมีคุณภาพต่ำ
การเผาไหม้แบบหมุนเวียน (Rotary hearth furnace)	เตาหลอมแบบเคลิน (Kiln)	ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูง เช่น กากตะกอนของสารอินทรีย์เหลวและเศษอาหารหรือของเสียขนาดใหญ่ ความสามารถในการไหลถูกจำกัดโดยขนาดของเชื้อเพลิง
การเผาไหม้แบบเครื่องฟนไฟ (Burner)	เครื่องฟนไฟ	เผาผงไม้หรือผงขนาดละเอียด เช่น เนื้อเยื่อที่อยู่ส่วนกลางของลำต้นอ้อยด้วยเครื่องฟนไฟเหมือนกับที่เผาเชื้อเพลิงเหลว

2.8.2 กระบวนการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงร่วมกัน

การใช้สารชีวมวลและถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงร่วมกัน (Co firing) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สารชีวมวลร่วมกับเชื้อเพลิงฟอสซิลในการเผาไหม้ของโรงงานไฟฟ้าระบบกำลังความร้อนและอื่นๆ ข้อดีของเทคโนโลยี คือ การดัดแปลงอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วอย่างงานเพื่อใช้สารชีวมวลในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นไปได้ในการเผาสารชีวมวลให้เกิดประสิทธิภาพสูงในโรงงานเผาไหม้ขนาดใหญ่ งานวิจัยและการ

พัฒนาเทคโนโลยีในการใช้ถ่านหินและไม้ชีวมวลร่วมกันในการเผาไหม้ที่สำเร็จโดยความช่วยเหลือร่วมกันของบริษัท Chugoku Electric Power Co., Inc. Hitachi Ltd. และ Babcock-Hitachi K.K.

2.8.3 กระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification)

เป็นการเปลี่ยนวัตถุดิบชีวมวลของแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สวัตถุดิบตั้งต้นทางเคมี คือ แกซิฟิเคชันหรือแกซิฟิเคชันทางเคมีและความร้อน

2.8.3.1 การจัดประเภทของกระบวนการแกซิฟิเคชัน

จากตาราง 2.10 จะแสดงการแบ่งประเภทของกระบวนการแกซิฟิเคชันโดยอาศัยปัจจัยเงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 2.10 การแบ่งประเภทของกระบวนการแกซิฟิเคชัน [13]

การแบ่งประเภท	ปัจจัยเงื่อนไข
ความดันแกซิฟิเคชัน	ความดันปกติ (0.1 ถึง 0.12 เมกกะปาสคาล) ความดันสูง (0.5 ถึง 2.5 เมกกะปาสคาล)
อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน	อุณหภูมิต่ำ (700 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า) อุณหภูมิสูง (700 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า) อุณหภูมิสูงในการสลายตัว (จุดหลอมเหลวและสูงกว่า)
สารที่ทำให้เกิดแกซิฟิเคชัน	อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำและสารประกอบของสารเหล่านั้น คาร์บอนไดออกไซด์
การให้ความร้อน (การเกิดโซลอนุกรม)	แกซิฟิเคชันโดยตรง (ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของแกซิฟิเคชัน บางส่วนของวัตถุดิบและออกซิเจน) แกซิฟิเคชันโดยอ้อม (ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบและสารที่ทำให้เกิดแกซิฟิเคชันโดยความร้อนจากภายนอก)
ชนิดของแกซิไฟเออร์ (Gasifier)	เบดนิ่ง (Fixed bed) เบดไหล (Flow bed) เบดไหลแบบหมุนเวียน (Circulating flow bed) เบดแบบนำพาอนุภาคให้ไหลไปตามกระแสของของเหลว (Entrained bed) เบดที่มีการผสม (Mixing bed) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) หอคู (Twin tower) เตาหลอมเหลว (Molten furnace)

2.8.3.2 สารที่ทำให้เกิดแกซิฟิเคชัน

เพื่อที่จะเปลี่ยนสารชีวมวลของแข็งเป็นแก๊สเผาไหม้ได้ สารที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนั้นมีความสำคัญสารนี้เรียกว่า สารที่ทำให้เกิดแกซิฟิเคชันและอากาศ ออกซิเจน

ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นสารผสมที่เหมาะสม อากาศ (ซึ่งทำปฏิกิริยากับออกซิเจน) และออกซิเจนที่เกิดจากความร้อนโดยการออกซิเดชันและออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นลดประสิทธิภาพของการเกิดแก๊สเผาไหม้

2.8.3.3 ปรากฏการณ์พื้นฐานของแกซิฟิเคชันของสารชีวมวล

1. การระเหยของความชื้นพื้นผิว

ความชื้นพื้นผิวนั้นระเหยจากวัตถุดิบที่อุณหภูมิของการเดือดของน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับความดัน ความชื้นภายในจะมีเหลืออยู่มากถ้าวัตถุดิบมีขนาดใหญ่

2. การระเหยของความชื้นภายใน

หลังจากการระเหยของความชื้นที่พื้นผิว ความชื้นภายในจะระเหยที่อุณหภูมิตั้งแต่ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส

3. การระเหยกลายเป็นไอ

การสลายตัวทางความร้อนของสารชีวมวลเริ่มที่อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส และคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำจะระเหยเป็นแก๊ส การสลายตัวทางความร้อนเป็นปฏิกิริยาที่มีความร้อนเกิดขึ้นซึ่งเป็นปรากฏการณ์ ลักษณะเฉพาะของสารชีวมวล ($C_nH_mO_p$)

4. การระเหยกลายเป็นไอและปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่างการระเหยกลายเป็นไอและสารระเหยซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบา (C_xH_y : เมื่อ x และ y เป็นจำนวนเต็มที่มีค่าน้อยเท่ากับ 1 ค่า x ที่ต่ำบ่งบอกว่าเบา และค่า x ที่สูงบ่งบอกว่าหนัก) จะถูกเปลี่ยนเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักสูง และมีจุดเดือดสูง ไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารที่ช่วยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สที่สะอาดซึ่งโมเลกุลเบา แม้ว่าทาร์และเขม่าจะเกิดขึ้นเมื่อการแพร่กระจายของสารที่ช่วยเปลี่ยนเป็นแก๊สนั้นช้าและไฮโดรคาร์บอนเกิดการควบแน่น

5. แกซิฟิเคชันของถ่านชาร์

หลังจากการระเหยของสารระเหยที่สะสมในวัตถุดิบชีวมวล คาร์บอนคงที่และถ่านจะกลายเป็นถ่านชาร์ และถ่านชาร์จะไปให้ความร้อนแก่อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาต่อมากับสารที่ช่วยให้เปลี่ยนเป็นแก๊สโดยจะเปลี่ยนคาร์บอนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามในกรณีที่สารที่ช่วยให้เปลี่ยนแก๊สนั้นมีไอน้ำมากเกินไปและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมนั้นมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแก๊สเปือก ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) ผลิตแก๊สซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน

6. เศษถ่านชาร์ที่เหลือ

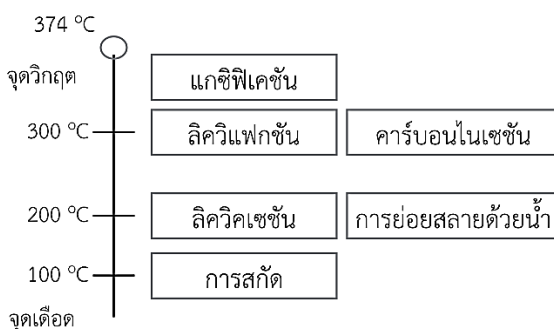
เมื่ออัตราปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแก๊สเป็ยกนั้นช้า เศษถ่านชาร์ที่เหลือจะเกิดขึ้นได้โดยง่าย การเกิดของทาร์ เขม่า และถ่านชาร์จะลดประสิทธิภาพและทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์

2.8.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชัน (Hydrothermal liquefaction)

ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชัน คือ การไพโรไลซิสในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 10 เมกะปาสคาลและอุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส สารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สของเหลวและของแข็งซึ่งจะคล้ายกับไพโรไลซิสในเฟสแก๊ส ทาร์ที่มีน้ำหนักเบา เช่น ไพโรลิกเนี่ยสนั้นจะละลายน้ำได้ ทาร์ที่มีน้ำหนักมากจะได้รับการผสมกันกับชาร์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงได้แก่ แก๊ส สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และสารจำพวกน้ำมัน

2.8.4.1 ลักษณะของไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชัน

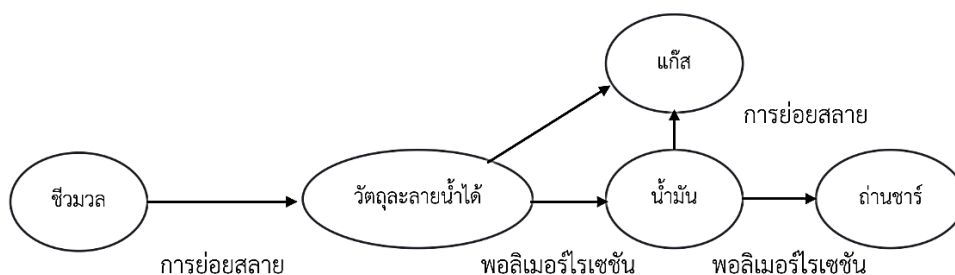
ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชันนั้นทำปฏิกิริยาในน้ำ วัตถุประสงค์ตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับสารชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูงเช่น สารชีวมวลน้ำ ขยะกากอินทรีย์และอื่นๆ นอกจากนั้นปฏิกิริยาหลายชนิดสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่แตกต่าง ดังรูป 2.5 แสดงปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส สารที่ละลายได้จะละลายในน้ำและเหมาะกับการสกัดสาร เหนืออุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เกิดการไฮโครไลซิสและสารชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลส โปรตีน และอื่นๆจะถูกย่อยจากพอลิเมอร์เป็นโมโนเมอร์ และที่อุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียสและความดัน 1 เมกะปาสคาล ของแข็งจำพวกสารชีวมวลจะถูกทำให้เป็นของเหลว (Slurry) และสารจำพวกน้ำมันยังไม่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและความดัน 10 เมกะปาสคาล ลิกวิแฟกชันจะเกิดขึ้นและจะได้สารจำพวกน้ำมันเมื่อเงื่อนไขของปฏิกิริยาเปลี่ยน เช่น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์หลักจะถูกถ่านชาร์ (ไฮโดรเทอร์มัลและคาร์บอนไนเซชัน) และที่จุดวิกฤตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊ส



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง

2.8.4.2 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชัน

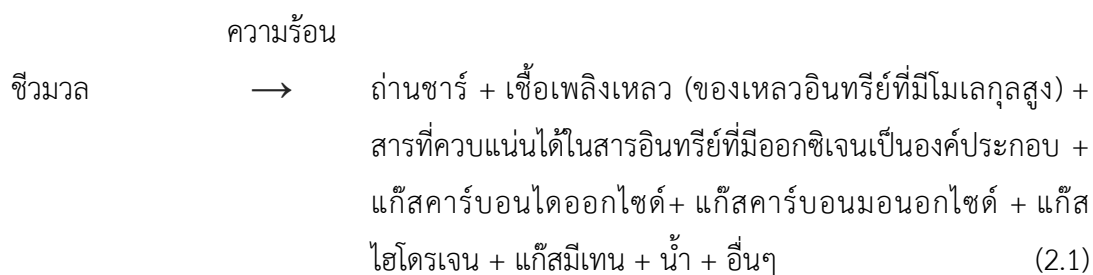
ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชันเป็นการไพโรไลซิสตั้งนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแผนผังปฏิกิริยาพื้นฐานจะแสดงในรูป 2.6 ในขั้นตอนแรกสารชีวมวลจะถูกสลายเป็นสารที่ละลายน้ำ จากนั้นสารที่ละลายน้ำจะเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนเป็นน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยานานขึ้น น้ำมันที่เกิดขึ้นจะเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนเป็นถ่านชาร์



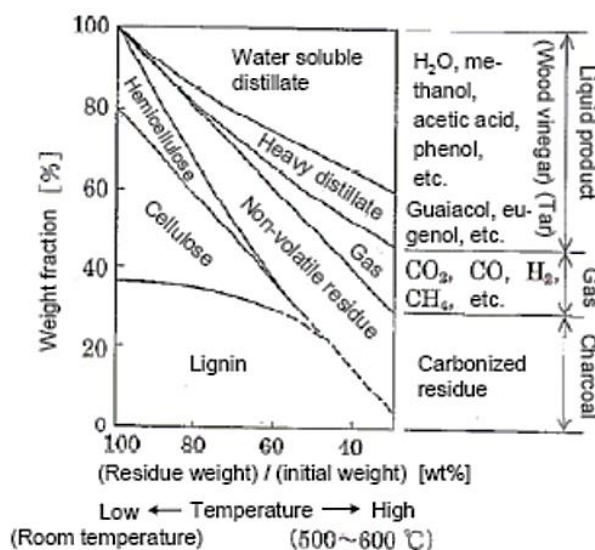
รูปที่ 2.6 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟกชันเบื้องต้น

2.9 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยา (ไม่ใช่ไอ้ไอน้ำไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือของเหลว ถ่านชาร์ และแก๊ส เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยาการแตกสลายของสารระเหย (Devolatilation) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) คอนเดนเซชัน (Condensation) ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชาร์ น้ำ และสารประกอบออร์แกนิก (Organic compound) แสดงดังสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) [13]



ความร้อน
 ของเหลวอินทรีย์ → สารอินทรีย์แอโรเมติก + ของเหลวอินทรีย์ที่มีโมเลกุลสูง + ถ่าน
 ชาร์ + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ +
 แก๊สไฮโดรเจน + แก๊สมีเทน + น้ำ + อื่นๆ (2.2)



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสารชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างเกิดการไพโรไลซิส [14]

2.9.1 ลักษณะของไพโรไลซิส

ในระหว่างปฏิกิริยาไพโรไลซิส จะแบ่งเป็นช่วงอุณหภูมิได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเป็นการระเหยออกไปของความชื้นบนพื้นผิวก่อนที่อุณหภูมิ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นช่วงที่สองจะเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 200 ถึง 260 องศาเซลเซียส และตามด้วยการสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 240 ถึง 340 องศาเซลเซียส และช่วงสุดท้ายจะเป็นการสลายตัวของลิกนินที่อุณหภูมิ 280 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสนั้นปฏิกิริยาของไพโรไลซิสจะสิ้นสุด ดังนั้นที่อัตราการป้อนความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อวินาทีจะส่งผลให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายในไม่เกิน 1 นาที แต่ในขณะที่ถ้าอัตราการป้อนความร้อนเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสต่อวินาทีจะทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายในไม่เกิน 5 วินาที ซึ่งอัตราการให้ความร้อนที่สูงจะเป็นผลทำให้เกิดของผลผลิตที่เป็นไอน้ำรวดเร็วขึ้น แต่ถ้าความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของผลผลิตที่เป็นไอน้ำลดลงและมีผลผลิตของของเหลวมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าไพโรไลซิสแบบเร็วหรือ ไพโรไลซิสแบบแฟลช โดยการไพโรไลซิสแบบเร็วจะมีผลผลิตของเหลวสูงร้อยละ 60 ถึง 80 นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนนั้นมีความสำคัญมากในปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการนำไปดัดให้เป็นอนุภาคนาขนาดเล็กก่อน

2.10 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้ไฟโรไลซิส

โดยทั่วไปกระบวนการไฟโรไลซิสจะสนใจและคำนึงถึงอัตราและปริมาณของสารระเหย การกระจายตัวของสารชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่างๆ รวมถึงภาวะในการไฟโรไลซิส ซึ่งปัจจัยทางเคมีที่สำคัญ คือ ส่วนประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในสารชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญ อาทิเช่น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อกระบวนการไฟโรไลซิสและผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.10.1 องค์ประกอบของชีวมวล

เมื่อทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับชีวมวลแต่ละชนิด [15] จะพบว่าชีวมวลนั้นจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนต่างๆของวัสดุดิบและชนิดของวัสดุดิบ ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางความร้อนและทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่างกัน โดยที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส จะมีการแตกตัวของพอลิแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันชีวภาพหรือน้ำมันทาร์ที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีถ่านชาร์จำนวนน้อย ซึ่งส่วนใหญ่ของลิกนินจะควบแน่นเป็นถ่านชาร์และสารประกอบพินอลบางส่วน ซึ่งความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละส่วนประกอบจะได้น้อยลง ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณถ่านชาร์และเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่ได้จากการไฟโรไลซิส

2.10.2 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Temperature)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [16] จะพบว่าผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะมีช่วงอุณหภูมิของการไฟโรไลซิสที่ส่งผลต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่กลายเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพออกมา โดยการไฟโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส จะเป็นการระเหยของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคออกมาและมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย ต่อมาช่วงที่สอง คือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียสนั้นจะมีการแตกตัวทางความร้อนและชีวมวลจะปลดปล่อยสารระเหยประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิระหว่าง 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยแก๊สออกมาพร้อมกับมีการแปลงสภาพของถ่านชาร์และมีการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจน ในการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยของอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสชีวมวล [17] ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าเริ่มเกิดการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะเกิดการแตกตัวของสารระเหยร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิจะมีผลต่อปฏิกิริยาการไฟโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณ

และองค์ประกอบสารระเหยได้ คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะทำให้น้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณของถ่านชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สที่ปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้น

2.10.3 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

อัตราการให้ความร้อน [18] เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและส่วนประกอบของสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมภาวะในการให้ความร้อนนั้นจะถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการให้ความร้อนประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว เช่นนั้นอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำจะถูกเทียบให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่วไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า 103 ถึง 105 องศาเซลเซียสต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ ในทางตรงกันข้ามการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูงนั้นเซลล์ูลอสจะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ผลิตภัณฑ์หรือถ่านชาร์น้อยมาก

สำหรับการไพโรไลซิส [19] ถ้าอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็วเกินไปจะส่งผลให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่สามารถระเหยได้มีมาก เช่นนั้นปริมาณถ่านชาร์จะมีค่าน้อยและการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการแตกตัวของสารชีวมวลจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวมากขึ้นซึ่งจะมีปริมาณมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากสารชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้นและโมเลกุลของน้ำมันชีวภาพที่อยู่ในภาวะแก๊สมิช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เพราะว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาในการสลายตัวของน้ำมันชีวภาพน้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและสมบัติของน้ำมันชีวภาพ จึงทำให้ได้น้ำมันชีวภาพ แก๊สมิเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราที่เร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดนั้นจะไม่แตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อนเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อกระบวนการไพโรไลซิสในการเกิดผลิตภัณฑ์หรือถ่านชาร์ของสารชีวมวลมากกว่าถ่านหิน เนื่องจากสารชีวมวลมีปริมาณของสารประกอบจะวกลเซลล์ูลอสสูง เช่นนั้นอัตราการให้ความร้อนจะมีผลอย่างมากต่อกระบวนการไพโรไลซิสของเซลล์ูลอส โดยเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเซลล์ูลอสและเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันของเซลล์ูลอส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลล์ูลอสที่มีความคงตัวอยู่มากขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยมาก

2.10.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาค [20] นั้นจะมีส่งผลกระทบต่อปริมาณของผลผลิตที่ได้เนื่องจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) คือ ขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวที่สูง (Surface area) ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเครื่องปฏิกรณ์นั้นสูงตามไปด้วยและเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กเกินไปนั้นเมื่อเกิดการสลายตัวขั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) [21] ได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น

2.10.5 ความดัน (Pressure)

ความดัน [22] เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณผลผลิตของสารระเหยที่ได้ เนื่องจากเมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) มากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่ความดันสูงและทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิมากขึ้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ควบแน่นได้ลดลงและทำให้เกิดแก๊สที่มีสารไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นแก๊สลดลง จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลว น้ำมันทาร์และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

2.10.6 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Residence time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน [23] เป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ คือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้น้อยด้วย และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนที่มากและทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้น เพราะว่สารระเหยต่างๆ จะเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิต่อไปได้อีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละองค์ประกอบของคาร์บอนลดลง เนื่องจากสารระเหยในตัวถ่านชาร์มีปริมาณลดน้อยลง

2.10.7 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ คือ ถ้าอัตราการไหลนั้นมีค่าสูงจะทำให้แก๊สตัวพาจัดสารระเหยต่างๆออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้เร็วขึ้น จึงทำให้สารระเหยที่ควบแน่นได้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้จนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงขึ้นและทำให้ถ่านชาร์ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแตกตัวทางความร้อนได้มากขึ้นด้วย และถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำ ทำให้สารระเหยต่างๆอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น จึงทำให้เกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิได้เป็นผลให้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกันปริมาณของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์นั้นจะลดน้อยลง

2.11 ผลผลิตที่ได้จากการไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ของเหลวนั้นมีความชื้นสูงขึ้นจากเดิม (ร้อยละ 8 ถึง 40) และน้ำที่เกิดขึ้น (ร้อยละ 14 ถึง 17) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างน้ำและสารอินทรีย์ที่มีขี้หรือเรียกว่าเฟสที่เป็นน้ำ (Aqueous phase) และมีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงประมาณ 12.5 ถึง 12 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อมีปริมาณของน้ำสะสมมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะมีความหนืดต่ำและมีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำด้วย อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นั้นไม่เสถียรจึงต้องมีการพัฒนาให้ดีขึ้น แต่สำหรับแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสนั้นจะมีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากและคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนหนึ่งถึงห้าซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นแก๊สเผาไหม้ได้ ส่วนถ่านชาร์ที่ได้มีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงประมาณ 32 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และเหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับแอกติเวตคาร์บอน (Activated carbon) อย่างไรก็ตามปริมาณถ่านชาร์ทั้งหมดถูกใช้เป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบของการไพโรไลซิส

2.11.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

ผลิตภัณฑ์ของแข็ง จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ [18] สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงของแข็งหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงของแข็งไร้ควันที่สำหรับใช้ในบ้านพักอาศัยและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดีเช่นเป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาวะแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารจำพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.11.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลว [24] นั้นจะประกอบไปด้วยน้ำ และสารที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันชีวภาพ ซึ่งองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างซับซ้อนและส่วนมากจะเป็นสารจำพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันชีวภาพจะมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ห้าถึงหกที่เป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ นั้นอาจจะมีมากกว่า 200 ชนิดและถูกแบ่งตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซีน เบนโซลติบ โทลูอิน และเอทิลเบนซีน
2. น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล (Phenol) และไพริดีน (Pyridine)

3. น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ โดเมททิลและแนพทาลิน
4. น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน และพีแนพทิน
5. พิตช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิ มากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

2.11.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

ผลิตภัณฑ์แก๊สจะมีทั้งแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ผสมอยู่ด้วยกันโดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน และเอทิลีน เป็นต้นโดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการต่างๆเพื่อให้ความร้อนหรือการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งส่วนประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ ได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจน ซัลไฟด์ และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

2.12 น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างทางเคมีซับซ้อน ซึ่งเป็นหนึ่งในส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยเป็นส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุดเพราะว่ามีค่าความร้อนที่ใช้สำหรับกำเนิดแหล่งพลังงานได้

2.12.1 ลักษณะทั่วไป

น้ำมันชีวภาพ [12] เป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลเข้มมีสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก อาจมีชื่อเรียกอื่นๆ เช่น น้ำมันไพโรไลซิส ของเหลวไพโรลิกเนียส กรดไพโรลิกเนียส น้ำส้มควันไม้ ของเหลวควันไม้ ซึ่งของเหลวสีน้ำตาลเข้ม ที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนจะมีสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols) อัลดีไฮด์ (Aldehydes) แอนไฮดริสซูการ์ (Anhydrosugars) ฟิวแรน (Furans) คีโตน (Ketones) และกรดอะซิติก (Acetic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบรวดเร็วโดยการแตกสายโซ่พอลิเมอร์ (Depolymerizing) ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นเป็นของเหลวเป็นน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก น้ำมันไพโรไลซิสเกิดขึ้นจากการแตกตัวทางความร้อนและการลดระดับเชิงพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินตามด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วเพื่อแช่แข็งปฏิกิริยาชั้นกลางให้ได้สารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างนี้โดยไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อ หากมีเวลามากขึ้น น้ำมันดิบ

ชีวภาพจึงมีสารเคมีที่มีแอกทิวิตีต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงเป็นองค์ประกอบมากมาย ทำให้มีสมบัติที่โดดเด่นและไม่ธรรมดา ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับภาวะของการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายน้ำได้มีสารอินทรีย์ที่มีประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 75 ถึง 80 โดยมวล และอีกร้อยละ 20 ถึง 25 เป็นน้ำ (ดังตารางที่ 2.11) น้ำมันชีวภาพมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 45 ถึง 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิดที่พบในน้ำมันดิบชีวภาพ

ในเชิงเคมีน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างน้ำ วานิลิน (Vanilin) ฟูรานคาร์บอกซัลดีไฮด์ (Furancarboxaldehyde) ไอโซยูจีนอล (Iso-eugenol) ไฟโทล (Phytol) กรดแอซิติก (Acetic acid) กรดฟอร์มิก (Formic acid) และกรดคาร์บอกซิลิกอื่นๆ (Other carboxylic acids) และสารประกอบกลุ่มหลักๆ เช่น ไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ ไฮดรอกซีคีโตน น้ำตาล และสารประกอบฟีนอลิกส์ น้ำมันชีวภาพอาจถือว่าเป็นสารประกอบแขวนลอย (Microemulsion) โดยมีสารประกอบโมเลกุลใหญ่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากกลีนิลลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของกลุ่มไฮโดรคาร์บอน สารผสมแขวนลอยรักษาเสถียรภาพได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และการเกิดนาโนมิเซลและไมโครมิเซล (Nano micelle and Micro micelle) ในเชิงกายภาพน้ำมันชีวภาพมีผงถ่านขนาดเล็กแขวนลอยอยู่และมีกลุ่มโลหะแอลคาไลเป็นส่วนประกอบ

ตารางที่ 2.11 ส่วนประกอบของน้ำมันชีวภาพ [24]

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
น้ำ	20-30
คาร์บอน	44-47
ไฮโดรเจน	6-7
ออกซิเจน	46-48
ไนโตรเจน	0-0.2
ซัลเฟอร์	<0.01
ซีเถ้า	0.1

2.12.2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายได้ในน้ำ เอทานอล และเมทานอล แต่ไม่ละลายในน้ำมัน ไฮโดรคาร์บอน น้ำมันชีวภาพสามารถกักเก็บได้ บี้มส่งได้ และสามารถใช้ในการเผาไหม้ได้คล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม โดยสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพแสดงดังตาราง 2.12 การเปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไม้กับน้ำมันเตาโดยน้ำมันชีวภาพไม่สามารถระเหยเป็นไอได้หมดในการกลั่น

ที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส จะเกิดการทำปฏิกิริยาในตัวเองได้กากของแข็งออกมาเป็นจำนวนมาก อาจถึงร้อยละ 50 โดยมวลและเป็นสารเคมีที่ไม่เสถียร มีการแปรผันของสมบัติตามเวลา เช่น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น อาจจะมีการแยกชั้นตามการระเหยน้อยลงและมีการฝังตัวของยางเหนียว เป็นต้น ความไม่เสถียรจะเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในการใช้งานจึงต้องกักเก็บที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.12 สมบัติทางกายและเคมีของน้ำมันชีวภาพ [24]

คุณสมบัติต่างๆ	น้ำมันชีวภาพ
ค่ากรดเบส (พีเอช)	2.5
ความถ่วงจำเพาะ (กรัมต่อมิลลิเมตร)	1.2
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	16-19
ความหนืด (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)	40-100
ของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2-1
กากของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	>50

2.12.3 การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าต่ำกว่าความร้อนเชื้อเพลิงฟอสซิล [24] เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ น้ำมันชีวภาพคล้ายกับน้ำมันเบาถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด เสถียรภาพ ค่าความเป็นกรด-เบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ นอกจากนี้การควบแน่นส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำออกจากน้ำมันชีวภาพได้และทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้น

การผลิตแก๊สสังเคราะห์ ชีวมวลและน้ำมันชีวภาพสามารถผ่านกระบวนการแปรผันของการผลิตเป็นเชื้อเพลิงสะอาดได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตแก๊ส พบว่าหากมีความต้องการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณเถ้าสูง แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณเถ้าที่น้อยกว่าจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้และการขนส่งน้ำมันชีวภาพที่มีความหนาแน่นมากกว่าชีวมวลก็สามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่ากรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็งนอกจากนี้ การทำแก๊สซิฟิเคชันของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์โทรป (Fisher tropes)

น้ำมันชีวภาพมีข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนให้กับเครื่องยนต์โดยตรง เพราะน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบหัวฉีดภายในเครื่องยนต์

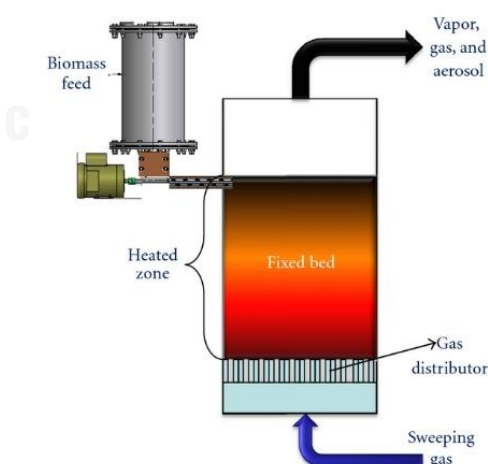
อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมามีรายงานว่าสามารถใช้น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ที่สามารถใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความคุ้มค่ามากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ซึ่งต้องมีการปรับสภาพของเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพให้มีลักษณะสมบัติที่เทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล

2.13 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพมี 5 ประเภท ได้แก่

2.13.1 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรซิสแบบเบดคงที่ (Fixed-bed reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบอย่างง่ายให้มีการบรรจุวัตถุดิบคงที่ภายในเครื่อง โดยวัตถุดิบจะไม่มีเครื่องที่ขณะที่ถูกให้ความร้อนและจนกระทั่งแตกตัวหมด สิ่งเคลื่อนที่ในเครื่องปฏิกรณ์ก็คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลซึ่งไหลออกจากระบบได้โดยการนำพาของแก๊สเฉื่อย ด้วยความดันภายในหรือด้วยการดูดออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (ดังรูปที่ 2.8) เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นปฏิกรณ์อย่างง่ายที่สุด จึงนิยมใช้กันมากในระดับการทดลองในห้องปฏิบัติการ การทดสอบการผลิตเบื้องต้นไม่ต้องใช้วัตถุดิบมากนัก แต่ในระดับการผลิตมีการนำระบบนี้มาใช้เช่นกัน ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ก็คือ จะต้องมีการเปิดฝาของเครื่องปฏิกรณ์ทุกครั้งหลังจากที่ปฏิบัติการเสร็จไปแล้วครึ่งหนึ่งเพื่อนำเอาผลผลิตที่เป็นของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์และป้อนวัตถุดิบชุดใหม่ลงไป เป็นครั้งๆไป (Batch systems) ดังนั้นระบบการผลิตจึงเป็นในรูปแบบกึ่งต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องเท่านั้น (Batch or Semi-Continuous batch reactor system)



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่แสดงในระบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Batch) [12]

2.13.2 เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรซิสแบบฟลูอิดไคซ์ (Fluidized bed reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบให้วัตถุดิบเกิดการเคลื่อนตัวในระบบปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน (Turbulence) จะกระทั่งแตกตัวหมด วัตถุดิบที่ป้อนเข้าจะถูกย่อยให้

มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนได้อย่างอิสระและใช้พลังงานในการทำให้เกิดความปั่นป่วนน้อย จากนั้นวัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าระบบแบบเป็นครั้งๆ ตามปริมาณที่ต้องการ เมื่อวัตถุดิบเข้าถึงภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนแก๊สตัวพาด้วยความเร็วสูงพอที่จะทำให้วัตถุดิบเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วน (ระบบนี้เป็นระบบที่มีการผสมของแก๊สกับของแข็ง) จากนั้นให้ความร้อนแก่ระบบจนกระทั่งวัตถุดิบแตกตัวหมดแล้วจึงป้อนวัตถุดิบเข้าอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของระบบนี้จึงสามารถเรียกได้ว่าเป็นแบบต่อเนื่อง

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอส์สามารถที่จะแบ่งออกตามลักษณะการเคลื่อนตัวของวัตถุดิบในเครื่องปฏิกรณ์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์แบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลของวัตถุดิบแบบปั่นป่วน ตามการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ การทำงานเริ่มจากการป้อนแก๊สที่เป็นตัวพาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับป้อนวัตถุดิบ และ/หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปด้วย ความเร็วของแก๊สที่ใช้จะทำให้เกิดการรวมตัวของวัตถุดิบและแก๊ส แล้วทำให้วัตถุดิบเกิดการเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วน และเกิดการยกตัวขึ้นไปตามทิศทางของการไหลของแก๊ส (ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นการเคลื่อนตัวขึ้นตามความสูงแนวตั้งของเครื่องปฏิกรณ์) เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนภายในระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวัตถุดิบแตกตัวหมด ความเร็วของแก๊สที่ใช้จะต้องเหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาควัตถุดิบอย่างปั่นป่วน (ณ จุดนี้เรียกว่าสถานะคงที่) แต่จะต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้แก๊สนั้นพาเอาอนุภาคของแข็งไปอุดอยู่ตรงบริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ หรือพาเอาอนุภาคขนาดเล็กผ่านออกไปจากระบบ

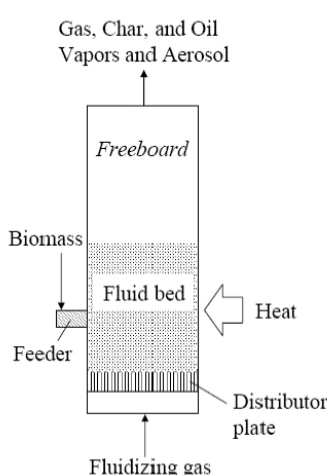
2. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์แบบไหลเวียน (Circulating fluidized bed) ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของวัตถุดิบ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นป่วนการทำงานก็จะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองแก๊ส คือ มีการใช้แก๊สเป็นตัวนำพา แต่มีที่ต่างกันคือตรงที่มีการไหลเวียนของวัฏภาคของแข็ง ซึ่งในที่นี้หมายถึง ตัวปฏิกิริยาไหลเวียน (Circulating) นั้นมีนัยบ่งบอกถึงคุณลักษณะสำคัญ 2 ประการ คือ การแยกเอาวัฏภาคที่เป็นของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์ และการหมุนเวียนเอาของแข็งนั้นกลับไปใช้ใหม่ในระบบ

สิ่งหนึ่งที่ทำให้เชื่อและมั่นใจว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์นั้น สามารถทำงานได้อย่างคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ก็คือ การใช้งานในอุตสาหกรรมแล้วได้ผลดี เช่น ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน มีการนำเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ไปใช้ในการแตกตัวของน้ำมัน (FCC unit) ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์สำหรับกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน มีดังนี้

1. มีการผสมรวมตัวอย่างดีของวัตถุดิบที่เกิดจากการเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วน เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและเกิดการแตกตัวได้ดี การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปได้อย่างทั่วถึงและคงที่ ไม่ทำให้เกิดจุดที่ร้อนหรือเย็นจนเกินไปในเครื่องปฏิกรณ์

2. ช่วงอุณหภูมิการทำงานค่อนข้างต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นๆ
3. การถ่ายเทมวลและความร้อนเกิดขึ้นได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นๆ
4. การเคลื่อนตัวของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นเหมือนตัวนำพาความร้อนไป ในขณะที่เคลื่อนที่ด้วย ดังนั้น การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว (โดยเฉพาะกับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ หรือการถ่ายความร้อนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์คู่) ทำให้เกิดถ่านโค้กหรือน้ำมันดิบได้ นอกจากนี้ การเคลื่อนตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาของของแข็งนั้น ทำให้สามารถเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยง่ายในกรณีที่ตัวเร่งหมดสภาพการใช้งาน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง
5. ระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถใช้แก๊สตัวนำพาได้หลายชนิด สามารถใช้กับช่วงอุณหภูมิที่กว้างได้ และสามารถปรับเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างสะดวก
6. ใช้เวลาในการซ่อมบำรุงน้อย และค่าการซ่อมบำรุงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นๆ ที่มีส่วนที่ร้อนและเคลื่อนที่เหมือนกัน เป็นผลให้มีความยืดหยุ่นในการลงทุนสูง เหมาะสมกับการลงทุนทั้งในโรงงานขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบไหลเวียน มีข้อดีมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบฟองแก๊ส เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบไหลเวียนนั้น (1) ไม่ต้องอาศัยการเกิดฟองแก๊สในการทำงานทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างแก๊สและของแข็งได้มากขึ้น (2) มีขนาดหน้าตัดเครื่องปฏิกรณ์ที่เล็กกว่า ทำให้เพิ่มความเร็วเชิงเส้นในเครื่องปฏิกรณ์ (3) สามารถควบคุมการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า โดยการควบคุมความเร็วของแข็งที่เคลื่อนที่หมุนวน (4) มีโอกาสน้อยกว่าที่อนุภาคของแข็งจะจับตัวหรือรวมกัน (5) มีการผสมกันของที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ในเชิงรัศมี ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีช่องทางป้อนของแข็งเป็นจำนวนมาก และ (6) มีอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งที่เร็วกว่า



รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบฟลูอิดไคซ์ [12]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yanik และคณะ [25] ศึกษาการไพโรไลซิสของสาหร่าย (สาหร่ายสีน้ำตาลสองชนิดและสาหร่ายหลากหลายชนิดจากทะเลดำ) และลิกโนเซลลูโลส (ก้อนน้ำมันดอกคำฝอยและเมล็ดตองุ่น) ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไซด์เบด ซึ่งให้ผลของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส (ถ่านชาร์ น้ำมันชีวภาพ และแก๊สชีวภาพ) จะเป็นตัววัดถึงคุณภาพให้การผลิตในครั้งนี้ สำหรับผลิตภัณฑ์ของไพโรไลซิสที่ควบแน่นได้นั้นจะมีสองชั้นที่แยกกัน คือ เฟสที่มีน้ำกับน้ำมัน นอกจากนี้ผลผลิตและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของสาหร่ายจะถูกนำไปเทียบกับชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลส ซึ่งจะพบว่าผลผลิตของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายที่ชนิดแตกต่างกันนั้น จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 11 ถึง 17 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ผลผลิตของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลสอยู่ในช่วงของร้อยละ 23 ถึง 40 โดยน้ำมันที่ได้จากชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลสพบว่ามีค่าความร้อนสูงกว่า 30.04 ถึง 31.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าของน้ำมันชีวภาพจากสาหร่าย แต่สำหรับผลผลิตของเฟสที่มีน้ำจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสและสาหร่ายจะมีค่าประมาณร้อยละ 19 ถึง 20 และร้อยละ 17 ถึง 26 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแก๊สชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะเห็นได้ว่าสาหร่ายมีคาร์บอนร้อยละ 17 ถึง 37 ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ปริมาณของถ่านชาร์ที่จะได้จากการทำไพโรไลซิสของสาหร่ายจะอยู่ที่ร้อยละ 26 ถึง 36 ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบแล้วมีค่าความร้อนที่สูงกว่าชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลส

Wang และคณะ [26] ศึกษาผลผลิตและองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งจะให้เห็นได้ว่าการไพโรไลซิสของสาหร่ายที่ผ่านการสกัดหรือทางอ้อมนั้นเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการแปรผันของคาร์บอนไฮเดรตและโปรตีนเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยการไพโรไลซิสของสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยการสกัดไขมันจะมีผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงกว่าสาหร่ายที่ทำการไพโรไลซิสโดยตรงหรือสาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการสกัด ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของสารจำพวกเอ็นเฮทเทอโรไซคลิกกับฟีนอลและการลดลงของไฮโดรคาร์บอนในการไพโรไลซิสของสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการสกัด จะเห็นได้ชัดจากการกระจายตัวของคาร์บอนนั้นลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสาหร่ายที่จะถูกนำมาไพโรไลซิสเพื่อผลิตน้ำมัน นอกจากนี้ยังมีการทำแบบจำลองขึ้นโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 4.4 ซึ่งจะแสดงถึงแนวโน้มของผลผลิต

Maddi และคณะ [27] ศึกษาการไพโรไลซิสโดยทำการทดลองกับวัตถุดิบจำพวกสาหร่ายและลิกโนเซลลูโลสภายใต้ภาวะและเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมือนกันสำหรับการเปรียบเทียบค่าผลผลิตและส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (น้ำมันชีวภาพ แก๊สชีวภาพ และถ่านชาร์) ซึ่งทั้งๆที่มีความแตกต่างในองค์ประกอบของพอลิเมอร์ชีวภาพและลักษณะสมบัติของวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับการแปรผันทางความร้อนขององค์ประกอบเคมี เช่น คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน สัดส่วนโดยโมลของคาร์บอนต่อ

ออกซิเจน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน พบว่ามีผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้จากสาหร่ายและวัสดุ
 ลิกโนเซลลูโลสที่มีความใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับค่าความร้อนที่ได้ อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพจาก
 สาหร่ายยังมีส่วนประกอบที่หลากหลายและมีสารประกอบของไนโตรเจน (ส่วนใหญ่เกิดจากการย่อย
 สลายของโปรตีน) โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามันเป็นไปได้ในการแปรผันสารอาหารของสาหร่ายที่
 อาจส่งผลให้ได้น้ำมันชีวภาพที่สูงขึ้นจนสามารถเทียบเท่ากับน้ำมันชีวภาพจากชีวมวล
 ลิกโนเซลลูโลส

Hu และคณะ [28] ศึกษาการไพโรไลซิสของสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวที่ทำการทดลอง
 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งเพื่อตรวจสอบปัจจัยของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิของ
 การไพโรไลซิส ขนาดอนุภาคและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์และ
 คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพ ซึ่งอุณหภูมิของการไพโรไลซิส ขนาดอนุภาคและอัตราการไหลของแก๊ส
 ไนโตรเจนจะถูกกำหนดอยู่ในช่วงที่แตกต่างกัน เช่น 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส 0.25 ถึง 2.50
 มิลลิเมตร และ 50 ถึง 400 มิลลิลิตรต่ออนาที ตามลำดับ พบว่าผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดได้เท่ากับ
 ร้อยละ 54.97 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิของไพโรไลซิสเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.25
 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่ออนาที โดยในที่นี้การวิเคราะห์
 องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพได้รับตรวจสอบเพื่อนำมาการพิจารณาจะพบว่า
 น้ำมันชีวภาพจากสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวอาจจะเป็นแหล่งที่มีศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงจาก
 แหล่งหมุนเวียนที่มีค่าความร้อนของ 31.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

Yuan และคณะ [29] ศึกษาการไพโรไลซิสของสาหร่ายสีน้ำตาลสองชนิดและมหาสาหร่าย
 สีแดง ซึ่งจะได้รับการตรวจสอบสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 300 ถึง
 600 องศาเซลเซียส โดยมหาสาหร่ายนั้นจะแตกต่างจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่มีปริมาณสารประกอบ
 ของไนโตรเจน ซัลไฟด์และเถ้าสูง จึงทำให้การผลิตสูงสุดของน้ำมันชีวภาพที่ 500 องศาเซลเซียสนั้น
 มีผลผลิตอยู่ระหว่างร้อยละ 37.5 และ 47.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนประกอบหลักในน้ำมันชีวภาพจาก
 สาหร่ายจะแตกต่างอย่างมากกับชีวมวลลิกโนเซลลูโลสโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการมีอยู่ของสารจำพวก
 ไนโตรเจนที่มีจำนวนมาก สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นจะมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ในขณะที่
 สารไฮโดรคาร์บอนจำพวกคาร์บอนหนึ่งถึงคาร์บอนสี่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นที่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป
 นอกจากนี้การปรับสภาวะของสาหร่ายด้วยการล้างกรดจะทำให้ลดปริมาณถ่านชาร์ลงจึงอาจส่งผลให้
 ประสิทธิภาพของการผลิตน้ำมันชีวภาพดีขึ้น แต่ถึงอย่างนั้นการใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพจาก
 สาหร่ายเป็นแหล่งพลังงานทดแทนจะถูกทดสอบต่อไป

Li และคณะ [30] ศึกษาการนำสาหร่ายสีน้ำตาลจากทะเลมาเก็บรวบรวมและทำการแปรผัน
 เป็นน้ำมันชีวภาพผ่านการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันที่มีเครื่องปฏิกรณ์แบบพิเศษ จะพบว่าได้ผลผลิต
 สูงสุดร้อยละ 32.1 ± 0.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำมันชีวภาพจะเกิดขึ้นหลังจาก 15 นาทีที่อุณหภูมิ 340

องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของวัตถุดิบ 15 กรัมมวลชีวภาพต่อ 150 มิลลิลิตรของน้ำ โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับน้ำมันชีวภาพนี้จะมีค่าความร้อนอยู่ที่ 27.1 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำ ไขมัน แอลกอฮอล์ ฟีนอล เอสเทอร์ อีเทอร์ และสารประกอบของแอโรมาติกที่เหลือเป็นของแข็งมีปริมาณถ่านชาร์และออกซิเจนสูง จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสาหร่ายสีน้ำตาลจากทะเลมีศักยภาพเป็นวัตถุดิบชีวมวลสำหรับการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนและสารเคมี



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีต่อผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสของจุลสาหร่ายชนิดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือสาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina platensis*: *Spirulina sp.*) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยดำเนินการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายด้วยการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดพร้อมทั้งวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

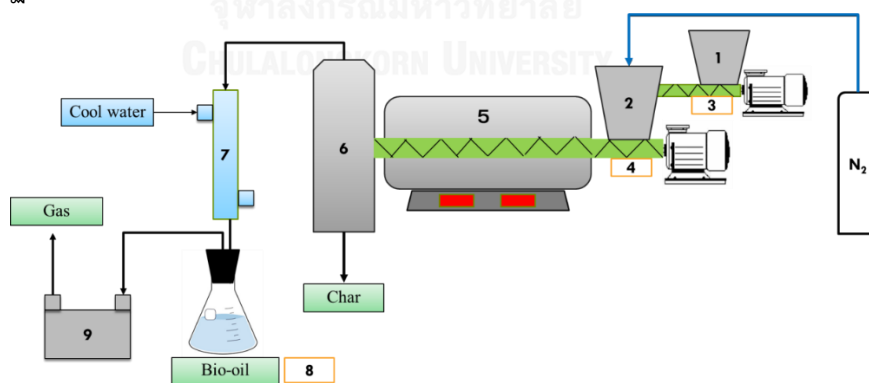
1. เตาอบไล่ความชื้น

เตาอบเป็นระบบลมร้อนที่สามารถใช้ออบไล่ความชื้นของจุลสาหร่ายได้โดยมีการตั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

2. เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคและตะแกรงร่อนขนาด

เป็นเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคและตะแกรงร่อนขนาดของยี่ห้อ Endecott SHAKER EF.1-1M411 ซึ่งทำงานด้วยไฟฟ้า 220/240 โวลต์ 50 เฮิร์ต ซึ่งตะแกรงร่อนคัดขนาดที่ใช้ในการทดลองจะมีขนาด 0.15 0.25 0.50 และ 0.85 มิลลิเมตร

3. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิส



รูปที่ 3.1 โครงร่างของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

หมายเลข 1: ตัวเก็บสารสำหรับใส่สารชีวมวล (Hopper 1)

หมายเลข 2: ตัวเก็บสารระบบปิดเพื่อกันอากาศเข้าสู่ระบบ (Hopper 2)

หมายเลข 3: ชุดสกรูที่มีขนาด 40 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร (Screw feeder 1)

หมายเลข 4: ชุดสกรูที่มีขนาด 120 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (Screw feeder 2)

หมายเลข 5: เตาเผา (Tube furnace)

หมายเลข 6: ตัวแยกสารสำหรับแยกถ่านชาร์ (Separator)

หมายเลข 7: ตัวควบแน่นสาร (Condenser)

หมายเลข 8: ขวดเก็บน้ำมันชีวภาพ (Flask)

หมายเลข 9: ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 3.2 จะแสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยสำหรับการไพโรไลซิสที่ใช้ในการทดลองจริง โดยจะมีส่วนประกอบตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งหมายเลข 1 และ 2 จะเป็นพื้นที่ในการพักสารชีวมวลก่อนถูกลำเลียงไปส่วนต่อไป ซึ่งจะมีหมายเลข 3 และ 4 เป็นชุดสกรูที่พาชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไปยังหมายเลข 5 ซึ่งเป็นชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจะถูกส่งไปยังหมายเลข 6 ซึ่งทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ออกและกักเก็บไว้ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เหลือจะไปยังหมายเลข 7 จะมีหน้าที่ควบแน่นสารระเหยลงไปยังหมายเลข 8 หรือถังเก็บน้ำมันชีวภาพ ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สจะถูกหมายเลข 9 หรือปั๊มสุญญากาศดูดออกไปและหมายเลข 10 หรือถังแก๊สไนโตรเจนพร้อมโรตารีมิเตอร์มีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์

จากรูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น 5975C inert XL MSD เป็นดีเทคเตอร์ จากบริษัท Agilent Technologies จำกัด โดยใช้แคปิลารีคอลัมน์ (Capillary column) จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาดยาว 30 เมตรและเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

จากรูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 ซึ่งมีตัวตรวจวัดแบบหวนนำความร้อน (Thermal conductivity detector) จากบริษัท Agilent Technologies จำกัด เพื่อใช้ในการหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000

จากรูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ รุ่น LECO – CHN2000 (CHN analysis) เพื่อวิเคราะห์หาค่าธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน โดยสัดส่วนของออกซิเจนได้จากการหาปริมาณโดยใช้วิธีผลต่าง (By difference)



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์หาค่าความร้อนรุ่น Parr 6200 Calorimeter

จากรูปที่ 3.6 เครื่องบอมบ์ แคลอริมิเตอร์ รุ่น Parr 6200 Calorimeter เพื่อหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสและจุลสาหร่าย



รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

จากรูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น 7890A พร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatography: SDGC) จากบริษัท Agilent Technologies จำกัด เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตาม คาบจุดเดือดของ สารไฮโดรคาร์บอน

3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. จุลสาหร่ายเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือสาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina platensis*) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง <math><0.15\ 0.15-0.25\ 0.25-0.5\ 0.5-0.84\ \text{และ}\ >0.84\ \text{มิลลิเมตร}</math>
2. แก๊สไนโตรเจนมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 ซึ่งถูกบรรจุในถังความดันสูง จากบริษัท BIG (ประเทศไทย) จำกัด
3. คาร์บอนไดซัลไฟด์
4. เตตระไฮโดรฟูแรน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองจะแบ่งได้อยู่สามขั้นตอน คือ การเตรียมและวิเคราะห์สารชีวมวล วิธีการทดลอง และวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส

3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์สารชีวมวล

1. นำจุลสาหร่ายไปทำการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร้อนให้มีขนาดอนุภาคระหว่าง <math><0.15\ 0.15-0.25\ 0.25-0.5\ 0.5-0.84\ \text{และ}\ >0.84\ \text{มิลลิเมตร}</math>
2. อบไล้ความชื้นในจุลสาหร่ายที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

3. นำจุลสาหร่ายไปทำการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis: ASTM D3173-D3175)
4. นำจุลสาหร่ายไปทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis: ASTM D3176)
5. จุลสาหร่ายจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Bomb Calorimeter: ASTM D2015)
6. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric Analysis /Differential thermal analysis: TGA/DTA)

3.3.2 วิธีการทดลอง

1. เปิดแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหลเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้ให้อากาศหรือออกซิเจนออกจากระบบภายในเครื่องปฏิกรณ์หมดก่อน
2. เปิดเครื่องปฏิกรณ์และทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามกำหนดที่จะศึกษาของในแต่ละกระบวนการ
3. เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าตามที่กำหนดไว้ นำเอาจุลสาหร่ายตักใส่ปิกเกอร์ให้เท่ากับ 200 กรัม ซึ่งขนาดอนุภาคที่ใช้จะเป็นไปตามที่กำหนดไว้ได้แก่ <math><0.15\ 0.15-0.25\ 0.25-0.5\ 0.5-0.84\ \text{และ}\ >0.84\ \text{มิลลิเมตร}</math> ขึ้นอยู่กับภาวะที่จะทำการทดลอง
4. ทำการปรับความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ในการป้อนสารชีวมวล
5. เปิดระบบของเครื่องทำน้ำเย็นเข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อให้สารระเหยนั่นเกิดการควบแน่นได้
6. เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สออกจากเครื่องปฏิกรณ์สู่ระบบควบแน่น
7. คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง
8. ทำซ้ำ 2 ครั้งโดยการสุ่มและบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ และหาภาวะของปัจจัยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายผ่านการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
9. ศึกษาตัวแปรของอัตราการป้อนสาร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและขนาดอนุภาคของจุลสาหร่ายโดยทำตามขั้นตอน 1 ถึง 7 โดยปรับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อศึกษาปัจจัยทั้งสามและหาภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายผ่านการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

3.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส

1. วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี
 - วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ด้วยเทคนิคบอมบ์แคลอรีมิเตอร์
 - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์

- วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทรเมทรี

- การวิเคราะห์หาประเภทของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

2. วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทั่วไป

- วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D1298

- วิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D445

- วิเคราะห์ปริมาณเอทานอลในน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM D 524-04

- วิเคราะห์ปริมาณของแข็งในน้ำมันชีวภาพ ตามมาตรฐาน ASTM D7579-09

- วิเคราะห์ปริมาณของกรดทั้งหมดด้วยการไตเตรต ตามมาตรฐาน ASTM D664

3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง

โดยการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว ถ่านชาร์ และแก๊ส คำนวณได้ดังสมการ

1. ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว (% Liquid yield)

$$= \frac{W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$$

2. ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์ (% Solid yield) = $\frac{W_{\text{ถ่านชาร์}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$

3. ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (% Gas yield) = 100 - ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว - ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

โดย

$W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว}}$ = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลอง

$W_{\text{ถ่านชาร์}}$ = น้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลอง

$W_{\text{ชีวมวล}}$ = น้ำหนักของจุลสาหร่ายที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีต่อผลผลิตจากกระบวนการไฟโรไลซิสของจุลสาหร่ายชนิดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*: *Spirulina sp.*) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยจะมีออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีต่อผลผลิตและคุณสมบัติทางกายและเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการป้อนสารชีวมวล อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนและขนาดอนุภาค

4.1 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของจุลสาหร่าย

ผลการวิเคราะห์สมบัติและลักษณะเบื้องต้นของจุลสาหร่ายหรือสาหร่ายสไปรูลินาโดยเทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis using a CHN analyzer) วิเคราะห์ปริมาณของค่าความร้อน (Bomb calorimeter)

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของจุลสาหร่าย

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณของจุลสาหร่ายจะเห็นได้ว่ามีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 7.07 โดยน้ำหนัก สารระเหยเท่ากับร้อยละ 81.35 โดยน้ำหนัก ซี้้เถ้าเท่ากับร้อยละ 6.15 โดยน้ำหนักและคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 5.43 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณของสารระเหยและคาร์บอนคงตัวของจุลสาหร่ายนั้นจะบ่งชี้ถึงปริมาณสารที่เกิดการไฟโรไลซิสกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ในทางกลับกันส่วนที่เหลือนั้นจะเป็นซี้้เถ้าที่ไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ และในส่วนของ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของจุลสาหร่าย พบว่าจุลสาหร่ายจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบอย่างง่าย (Empirical formula) ของคาร์บอนร้อยละ 4.36 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 9.54 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.69 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 1.79 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อนของจุลสาหร่าย 20.83 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าปริมาณของไนโตรเจนของจุลสาหร่ายนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าสารชีวภาพอื่นๆ [28] เนื่องจากธรรมชาติของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายมีสารอาหารจำพวกโปรตีนเก็บสะสมอยู่ในเซลล์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้หลังจากการไฟโรไลซิสของจุลสาหร่ายจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจนในสารประกอบด้วย

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของจุลสาหร่าย

วิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
ความชื้น	7.07
สารระเหย	81.35
ซีไธ	6.15
คาร์บอนคงตัว	5.43
วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
คาร์บอน	4.36
ไฮโดรเจน	9.54
ไนโตรเจน	0.69
ออกซิเจน **	1.79

*พื้นฐานแห้ง **จากผลต่าง

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคการแยกสกัด

จากตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในจุลสาหร่ายพบว่าจุลสาหร่ายชนิดสไปรูลีนาประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 5.1 ± 0.92 โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 1.38 ± 1.23 โดยน้ำหนัก คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 20.46 โดยน้ำหนัก โปรตีนร้อยละ 63.65 โดยน้ำหนัก และไขมันร้อยละ 6.18 โดยน้ำหนัก เนื่องจากจุลสาหร่ายนั้นมีองค์ประกอบที่คล้ายพืชและสัตว์ที่มีเซลล์เดียว [27] จึงทำให้สารชีวโมเลกุลของจุลสาหร่ายชนิดสาหร่ายสไปรูลีนาจะมีสารประกอบของลิโนเซลลูโลส แป้งและโปรตีน นอกจากนี้ยังมีการสะสมสารอาหารในรูปของไขมันที่อยู่ภายในเนื้อเยื่ออีกด้วย

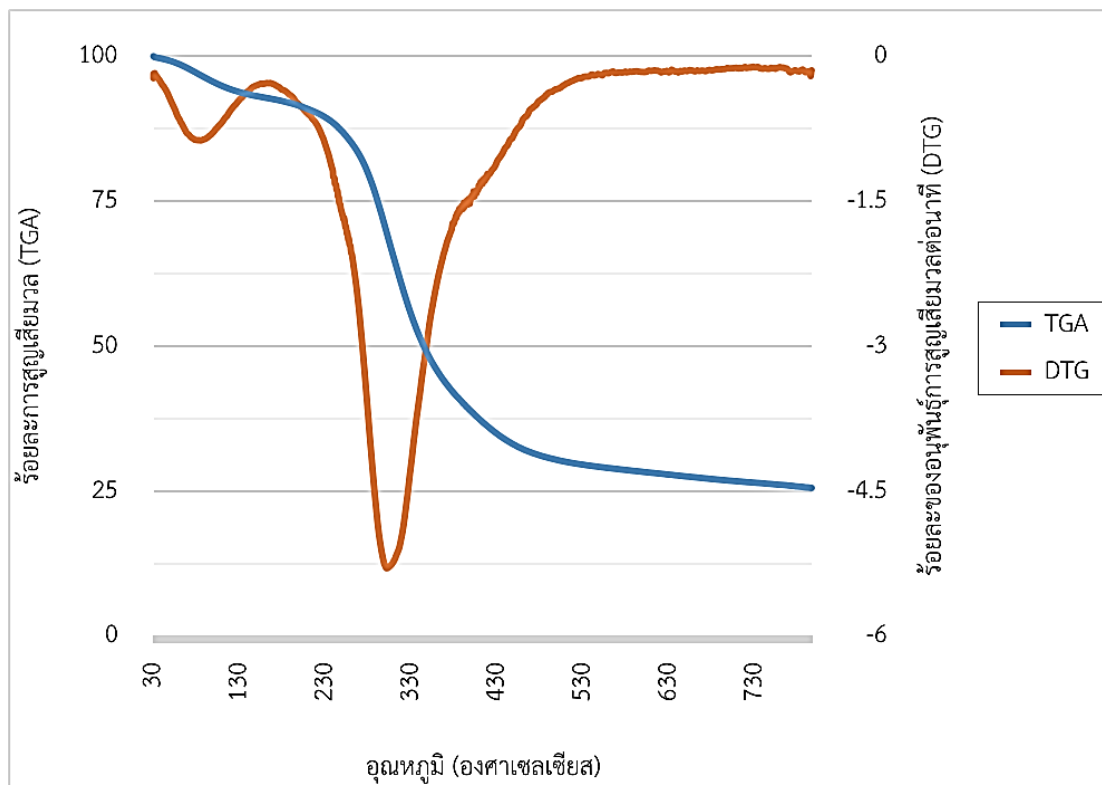
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของสารชีวโมเลกุลหลักในจุลสาหร่าย

องค์ประกอบ*	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
เซลลูโลส	5.1 ± 0.92
เฮมิเซลลูโลส	1.38 ± 1.23
ลิกนิน	N/A
คาร์โบไฮเดรต	20.46
โปรตีน	63.65
ไขมัน	6.18

*พื้นฐานแห้ง

4.1.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิ

เมตริก



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักและอัตราการสูญเสียน้ำหนักของจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่ายด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TG/DTA) ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีในสถานะไนโตรเจนอัตราการป้อนไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูป 4.1 พบว่า ผลของอัตราการสลายทางความร้อนของจุลสาหร่ายนั้นจะแบ่งได้อยู่ 3 ชั้น คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 108 องศาเซลเซียส จะเป็นการระเหยออกไปของความชื้นหรือน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของจุลสาหร่าย ต่อมาช่วงที่สองตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส เป็นการแตกตัวของสารระเหยภายในโครงสร้างเนื้อเยื่อและไขมันของจุลสาหร่าย และช่วงสุดท้ายจะเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 500 ขึ้นไป ซึ่งเป็นการสลายตัวของคาร์บอนหนักอย่างช้าๆ โดยผลการวิเคราะห์ของการสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่ายมีอัตราการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวของสารระเหยของจุลสาหร่ายทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเหลือส่วนของคาร์บอนคงตัวและซีเถ้าอยู่ประมาณร้อยละ 26 โดยจะเห็นได้ว่าไม่สอดคล้องกับปริมาณขององค์ประกอบแบบประมาณ เพราะว่าเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกจะทำการทดลองการสลายทางความร้อนภายใต้แก๊สไนโตรเจนนั้นมีกระบวนการทางความร้อน (Thermal

process) [31] ที่ต่ำกว่าแก๊สออกซิเจนที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ จึงทำให้เหลือส่วนของคาร์บอนคงตัวและซีไถ่ำนั้นเยอะกว่าคาร์บอนคงตัวและซีไถ่่าของการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

4.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

ในการทำไพโรไลซิสจุลสาหร่ายจะประกอบไปด้วย 4 ตัวแปรได้แก่

1. อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส
2. อัตราการป้อนสารชีวมวลเท่ากับ 0.41 0.61 1.13 2.91 และ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
3. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 100 150 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที
4. ขนาดอนุภาคเท่ากับ น้อยกว่า 0.15 0.15-0.25 0.25-0.50 0.50-0.84 และมากกว่า 0.84

มิลลิเมตร

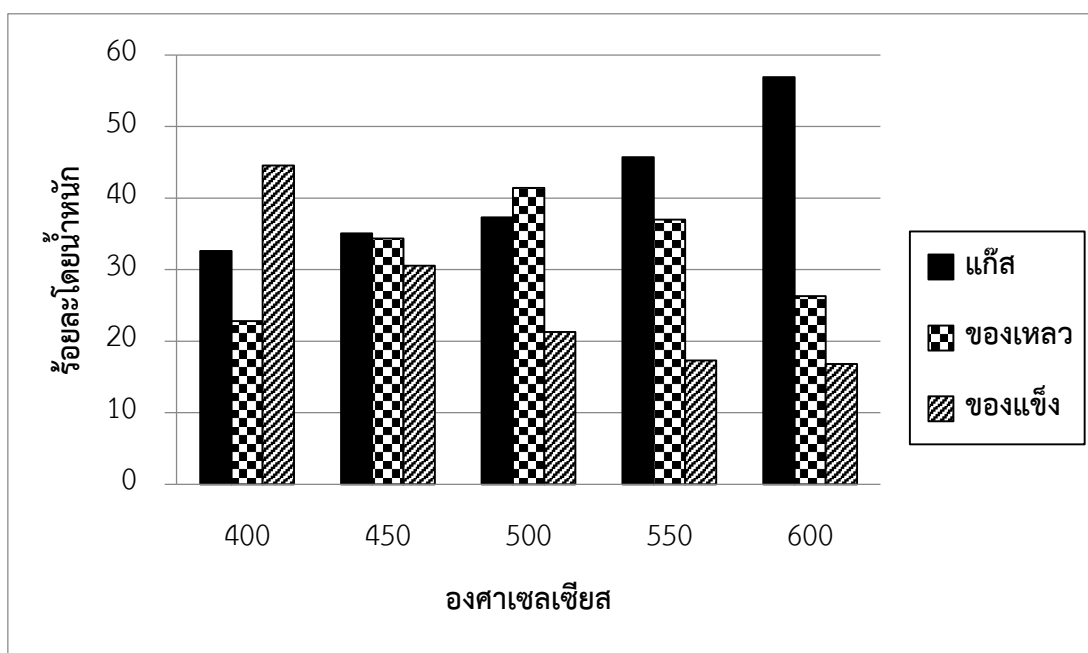
โดยทำการทดลองซ้ำสองครั้งแบบสุ่ม ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ นั้นถูกวิเคราะห์ว่าส่งผลต่อการไพโรไลซิสของชีวมวลเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวแล้ว [32]

4.2.1 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียสโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะพบว่าได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 22.81 ถึง 41.42 โดยน้ำหนัก ภายในการคงที่ภาวะของอัตราการป้อนสารชีวมวล 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีและขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ ของเหลว		ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์ เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	แก๊ส	เหลว	แข็ง
	400	31.98	33.25	20.79	24.84	47.23	41.91	32.61	22.81
450	36.55	33.61	35.29	33.43	28.16	32.96	35.08	34.36	30.56
500	40.49	34.15	41.09	41.74	18.41	24.11	37.32	41.42	21.26
550	49.56	41.83	35.89	38.13	14.55	20.04	45.70	37.01	17.29
600	56.62	57.20	26.88	25.70	16.49	17.10	56.91	26.29	16.80



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ต่อที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อทำการแปรผันของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียสนั้นจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 400 ถึง 450 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.81 เป็น 34.36 โดยน้ำหนัก ซึ่งช่วงแรกของการให้ความร้อนจะทำให้เกิดการระเหยไปของความชื้นและเกิดการย่อยสลายของสารระเหยจำพวกลิกโนเซลลูโลสให้กลายเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้จึงทำให้ได้ของเหลวที่มีโครงสร้างของน้ำตาลและคีโตนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น [33] ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 องศาเซลเซียส จะมีการย่อยสลายตัวของโครงสร้างลิกนินให้กลายเป็นสารประกอบจำพวกฟีนอล [34] จึงทำให้ปริมาณสารระเหยที่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 41.42 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงเหลือร้อยละ 26.29 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ [35, 36] อย่างต่อเนื่องและปริมาณของสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้นั้น จะมีการสลายตัวต่อไปกลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าลดลง โดยจะสามารถอธิบายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามสมการข้างล่างนี้

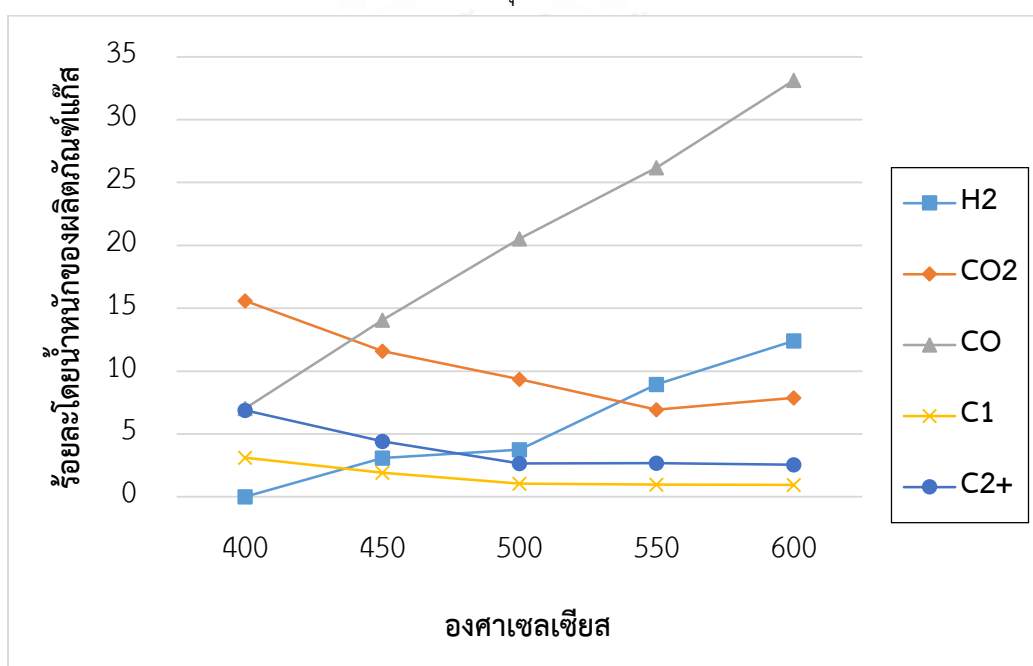
ความร้อน
ชีวมวล → ถ่านชาร์ + เชื้อเพลิงเหลว (ของเหลวอินทรีย์ที่มีโมเลกุลสูง) + สารที่ควบแน่นได้ในสารอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ + แก๊สไฮโดรเจน + แก๊สมีเทน + น้ำ + อื่นๆ (4.1)

ความร้อน
ของเหลวอินทรีย์ → สารอินทรีย์แอโรเมติก + ของเหลวอินทรีย์ที่มีโมเลกุลต่ำ + ถ่านชาร์ + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ + แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ + แก๊สไฮโดรเจน + แก๊สมีเทน + น้ำ + อื่นๆ (4.2)

ดังนั้นจากการศึกษาเมื่อทำกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 41.42 โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสมแก่การแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากสารระเหยที่เกิดขึ้นจากจุลสาหร่าย

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากจากจุลสาหร่ายโดยการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง โดยทำการคงที่อัตราการป้อนสารชีวมวล 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาคในช่วง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สจากจุลสาหร่าย

จากรูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากจุลสาหร่าย จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการกระบวนการไพโรไลซิสจะเป็นผลให้แก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้น เพราะว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยเพิ่มขึ้นจึงทำให้ไฮโดรเจนที่เชื่อมตัวอยู่หลุดออกมากกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น [37] แต่สำหรับแก๊สมีเทนหรือแก๊สชีวภาพจะลดลงตามอุณหภูมิในการกระบวนการไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณที่สูงขึ้นแต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับมีปริมาณที่ลดลง ซึ่งจะเกิดจากปฏิกิริยาบาวดาร์ด (Boudouard reaction) แสดงได้ดังสมการ 4.3 [35]



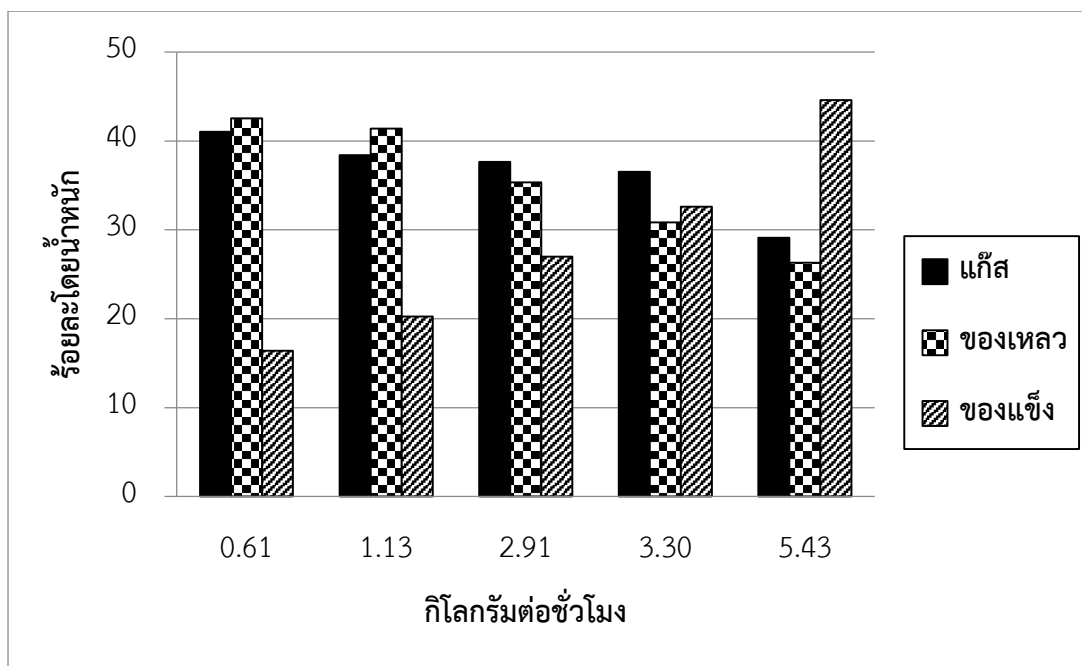
เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับถ่านชาร์ที่ความร้อนสูงจึงทำให้เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป

4.2.3 ผลของอัตราการป้อนสารชีวมวลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การศึกษาผลของปัจจัยของอัตราการป้อนสารชีวมวล 0.41 ถึง 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.5 ซึ่งจะพบว่าได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 30.85 ถึง 42.76 โดยน้ำหนัก ภายในการคงที่ภาวะของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราการป้อนสารชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อัตราการป้อนสาร (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	แก๊ส	เหลว	แข็ง
	1	2	1	2	1	2			
0.41	48.58	47.68	42.81	42.71	8.61	9.61	48.13	42.76	9.11
0.61	43.43	38.67	42.40	42.69	14.17	18.65	41.05	42.54	16.41
1.13	40.49	34.15	41.09	41.74	18.41	24.11	37.32	41.42	21.26
2.91	35.96	39.35	34.48	36.21	29.56	24.44	37.65	35.35	27.00
3.30	36.50	36.60	29.42	32.29	34.09	31.11	36.55	30.85	32.60



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการป้อนสารชีวมวลที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของอัตราการป้อนสารชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่อดำเนินการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารชีวมวลตั้งแต่ 0.41 ถึง 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะพบว่าอัตราการป้อนสารชีวมวลตั้งแต่ 0.41 ถึง 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมงนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่ออัตราการป้อนสารชีวมวลที่ค่ามากกว่า 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะมีร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะว่าเมื่ออัตราของป้อนสารชีวมวลเพิ่มขึ้นจะเป็นการลดช่วงเวลาของการแตกตัวในจุลสาหร่าย และสารระเหยที่เกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับความร้อนบริเวณพื้นผิวของเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้ที่อัตราการป้อนสารชีวมวลสูงจะมีปริมาณของผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารชีวมวลถูกปล่อยออกจากเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์สูง แต่สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นจะมีร้อยละของผลผลิตลดลงเพียงเล็กน้อย

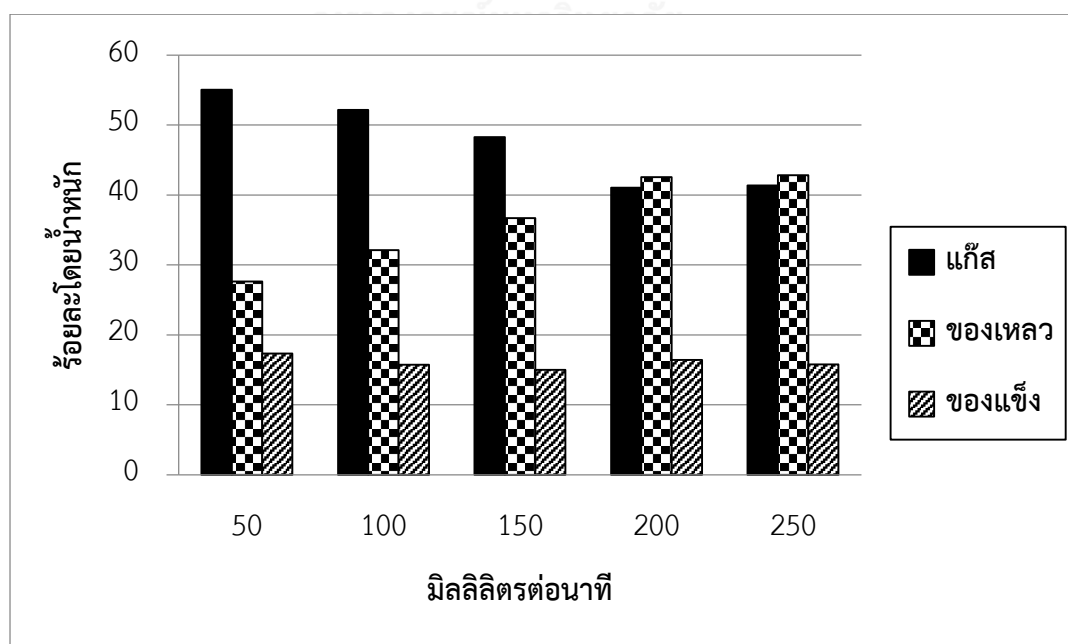
จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนสารชีวมวล 0.41 กับ 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมงมีร้อยละของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับอัตราการป้อนสารชีวมวล 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะมีผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์ที่มากกว่าอัตราการป้อนสารชีวมวล 0.41 กิโลกรัมต่อชั่วโมงซึ่งสามารถนำถ่านชาร์ไปใช้ประโยชน์ต่อได้ [18] และมีระยะเวลาในการเคลื่อนตัวที่เร็วจึงช่วยประหยัดเวลาในการทำปฏิกิริยา เช่นนั้นเมื่อทำการกระบวนการไพโรไลซิสที่อัตราการป้อนสารชีวมวล 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 42.54 โดยน้ำหนักจึงเหมาะสมแก่การแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากสารระเหยที่เกิดขึ้นจากจุลสาหร่าย

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลของปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50 ถึง 250 มิลลิลิตรต่อนาที โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่าได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 27.65 ถึง 42.85 โดยน้ำหนัก ภายในการคงที่ภาวะของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารชีวมวล 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อัตราการ ป้อนแก๊ส ไนโตรเจน (มิลลิลิตร ต่อนาที)	ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ ของเหลว		ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	แก๊ส	เหลว	แข็ง
	1	2	1	2	1	2			
50	57.84	52.24	26.33	28.96	15.83	18.79	55.04	27.65	17.31
100	54.45	49.84	30.72	33.53	14.83	16.63	52.15	32.12	15.73
150	49.06	47.54	36.91	36.50	14.02	15.96	48.30	36.71	14.99
200	43.43	38.67	42.40	42.69	14.17	18.65	41.05	42.54	16.41
250	43.38	39.36	42.19	43.51	14.43	17.12	41.37	42.85	15.78



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสจากจุลสาหร่าย

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการทดลองจะพบว่าเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สตัวพา 50 ถึง 250 มิลลิลิตรต่อนาที จะสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แต่สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊สจะมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์จะมีปริมาณที่ค่อนข้างคงที่เท่ากับร้อยละเฉลี่ย 16.41 โดยน้ำหนัก เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาซึ่งจะเป็นการพาสารระเหยที่ได้เกิดขึ้นผ่านเครื่องปฏิกรณ์ออกไปสู่คอนเดนเซอร์เพื่อให้เกิดการควบแน่นกลายเป็นเชื้อเพลิงเหลวและส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารระเหยให้กลายเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังควบคุมไม่ให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิที่ทำให้สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้กลายเป็นแก๊ส อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงเกินไปจะทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน เช่นนั้นถ้าแก๊สไนโตรเจนมีอัตราการไหลที่เหมาะสมก็จะทำให้เวลาการแตกตัวกลายเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นจนได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวได้สูงสุดด้วยเช่นกัน

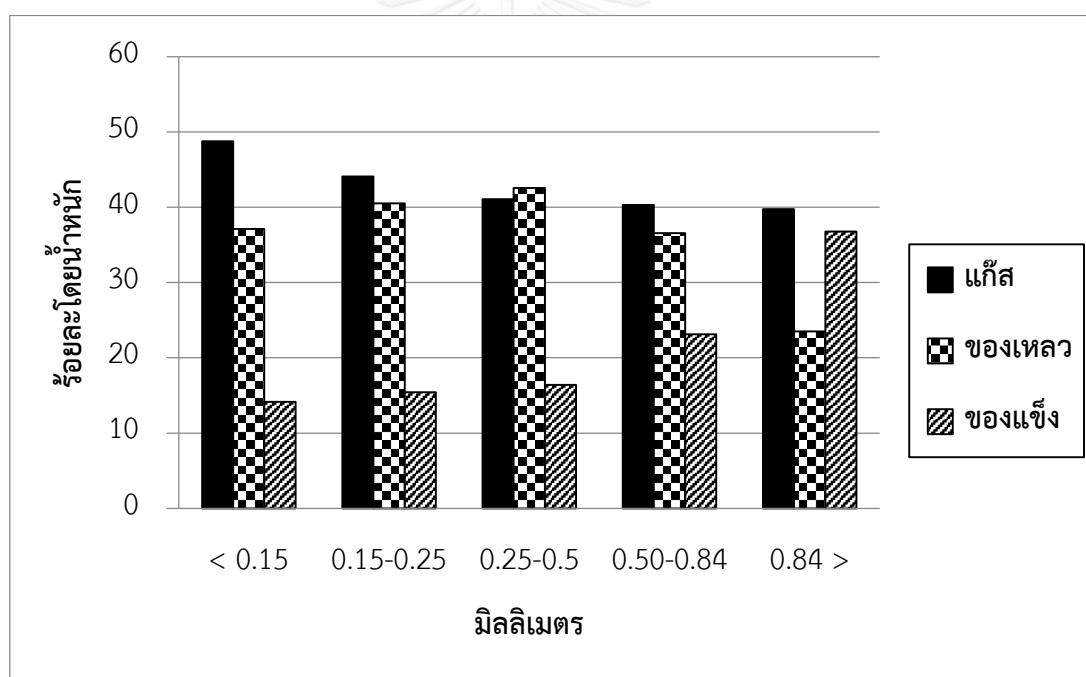
จากการศึกษาเมื่อทำกระบวนการไพโรไลซิสที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 42.54 โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสมแก่การแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากสารระเหยที่เกิดขึ้นจากจุลสาหร่าย เนื่องจากถ้าใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและทำให้เป็นการใช้แก๊สไนโตรเจนอย่างสิ้นเปลือง

4.2.5 ผลของขนาดอนุภาคต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวจากจุลสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลของปัจจัยของขนาดอนุภาคที่ น้อยกว่า 0.15 จนถึงมากกว่า 0.841 มิลลิเมตร โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 23.51 ถึง 42.54 โดยน้ำหนัก ภายในการคงที่ภาวะของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารชีวมวล 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.6 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

ขนาด อนุภาค (มิลลิเมตร)	ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ ของเหลว		ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	แก๊ส	เหลว	แข็ง
	< 0.15	50.84	46.64	36.64	37.55	12.52	15.80	48.74	37.10
0.15-0.25	48.16	39.97	39.09	41.94	12.75	18.08	44.07	40.52	15.42
0.25-0.5	43.43	38.67	42.40	42.69	14.17	18.65	41.05	42.54	16.41
0.50-0.84	38.74	41.84	37.56	35.59	23.69	22.57	40.29	36.58	23.13
0.84 >	41.42	38.03	22.44	24.58	36.14	37.39	39.72	23.51	36.76



รูปที่ 4.6 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไฟโรไลซิสจากจุลสาหร่าย

รูปที่ 4.6 แสดงผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองจะพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของจุลสาหร่ายตั้งแต่น้อยกว่า 0.15 จนถึงมากกว่า 0.84 มิลลิเมตรพบว่าเมื่อขนาดน้อยกว่า 0.15 จนถึง 0.25 มิลลิเมตร จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37.01 เป็น 42.54 โดยน้ำหนัก ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กนั้นจะทำให้เกิดการย่อยสลายของสารระเหยจำพวกลิกโนเซลลูโลสและลิกนินได้ดีจนทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจะมีการแตกตัวขึ้นทุติยภูมิเป็นผลให้สารระเหยที่สามารถควบแน่นได้บางส่วนกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส แต่เมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น

เป็นมากกว่า 0.84 มิลลิเมตร ผลผลิตภัณฑ์ของเหลวนั้นลดลงเหลือร้อยละ 23.51 โดยน้ำหนัก ซึ่งพอจะอธิบายได้ว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนที่เข้าสู่พื้นผิวของอนุภาค [38] โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีการถ่ายโอนความร้อนที่ดีเป็นผลกระบวนการให้ความร้อนที่อนุภาคมีสูงและมีอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็ว จึงส่งเสริมการเกิดไพโรไลซิสแบบเร็วได้เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น แต่เมื่อขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะมีการถ่ายโอนความร้อนที่ต่ำเป็นผลให้ผลผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าขนาดอนุภาคที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มปริมาณของผลผลิตภัณฑ์ของเหลวได้สูงสุดด้วย

การศึกษาเมื่อทำกระบวนการไพโรไลซิสที่ขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ผลผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 42.54 โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสมแก่การแตกตัวเป็นผลผลิตภัณฑ์ของเหลวจากสารระเหยที่เกิดขึ้นจากจุลสาหร่าย

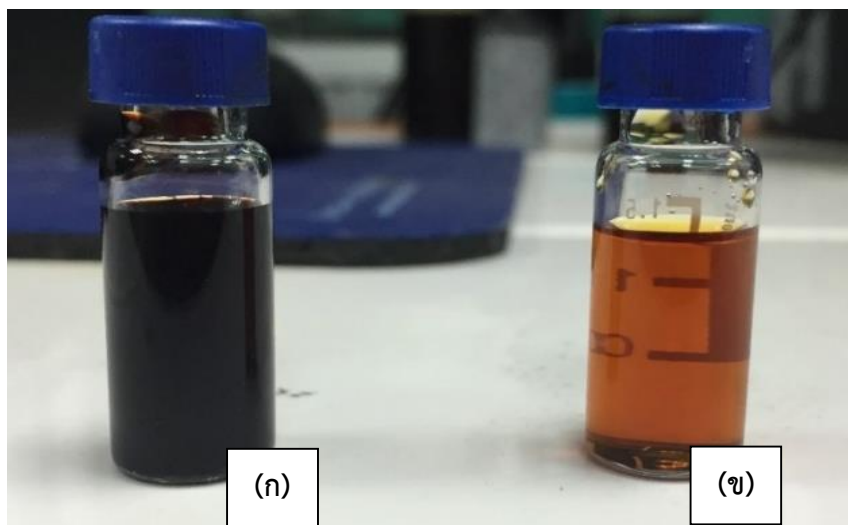
4.3 ศึกษาอัตราส่วนของเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันชีวภาพในผลผลิตภัณฑ์ของเหลว

ศึกษาอัตราส่วนของเฟสที่เป็นน้ำ (Aqueous phase) และน้ำมันชีวภาพในผลผลิตภัณฑ์ของเหลว จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารชีวมวล 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อ นาทีและขนาดอนุภาคของจุลสาหร่ายในช่วง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์อัตราส่วนของเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันชีวภาพ

ครั้งที่	ผลผลิตภัณฑ์ของเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เฟสที่เป็นน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำมันชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	40.49	58.38	41.62
2	42.67	51.72	48.28
3	43.29	54.65	45.35
เฉลี่ย	42.54	54.92	45.08

จากตารางที่ 4.8 จะแสดงปริมาณของเฟสที่เป็นน้ำและน้ำมันชีวภาพในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุลสาหร่ายโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง พบว่าผลผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนของรูป 4.7 (ก) นั้นจะเป็นเฟสของน้ำมันที่ไม่ละลายในน้ำหรือน้ำมันชีวภาพและส่วนของรูป 4.7 (ข) จะเป็นเฟสที่ละลายในน้ำได้หรือเฟสที่เป็นน้ำ โดยมีลักษณะของเฟสที่เป็นน้ำจะมีความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันชีวภาพและยังสังเกตเห็นสีที่แตกต่างกันระหว่างสองส่วนในผลผลิตภัณฑ์ของเหลว จึงทำการสกัดแยกออกจากกันด้วยวิธีการใช้กรวยแยก



รูปที่ 4.7 น้ำมันชีวภาพ (ก) และเฟสที่เป็นน้ำ (ข)

4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันชีวภาพและลักษณะเบื้องต้นของ จุลสาหร่ายชนิดสาหร่ายสไปรูลีนาโดยเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 วิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D445 วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D 524-04 วิเคราะห์ ปริมาณของแข็งในน้ำมันชีวภาพ ตามมาตรฐาน ASTM D7579-09 วิเคราะห์ปริมาณของกรดทั้งหมด ด้วยการไตเตรตตามมาตรฐาน ASTM D664

4.4.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเฟสที่เป็นน้ำ น้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์และจุลสาหร่าย

องค์ประกอบ	จุลสาหร่าย	เฟสที่เป็นน้ำ	น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์
คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.36	1.17	4.93	5.47
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	9.54	11.62	11.47	4.46
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.69	0.43	0.66	0.74
ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**	1.79	4.27	1.26	1.22
H/C (โมลต่อโมล)	2.19	9.94	2.33	0.82
O/C (โมลต่อโมล)	0.41	3.65	0.26	0.22

**จากผลต่าง (By difference)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบอย่างง่ายแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านชาร์ตามตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในเฟสที่เป็นน้ำนั้นจะมีค่าสัดส่วนของออกซิเจนกับไฮโดรเจนที่สูง ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของน้ำและกรดซัลฟิวริกที่ละลายอยู่ภายในของเหลว และเมื่อพิจารณาในส่วนของน้ำมันชีวภาพจะพบว่าองค์ประกอบของไฮโดรเจนกับคาร์บอนสูงแสดงถึงการเป็นสารไฮโดรคาร์บอนได้อย่างชัดเจน และสุดท้ายถ่านชาร์จะมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก และมีค่าที่ใกล้เคียงกับสารตั้งต้นหรือจุลสาหร่าย

4.4.2 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเท่ากับ 27.05 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าความร้อนของสารชีวมวลตั้งต้นหรือจุลสาหร่ายเท่ากับ 20.83 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เพราะว่าเมื่อจุลสาหร่ายผ่านการไพโรไลซิสจะทำให้องค์ประกอบของออกซิเจนหลุดออกไปจากโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส จึงทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้นกว่าสารชีวมวลตั้งต้น [36, 39] และเฟสที่เป็นน้ำจะไม่สามารถหาค่าความร้อนได้เนื่องจากส่วนที่เป็นน้ำมีองค์ประกอบของออกซิเจนเป็นจำนวนมากเกินไป และค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ 24.15 เมกะจูลต่อกิโลกรัมจะมีค่าสูงกว่าสารชีวมวลตั้งต้นอยู่เล็กน้อยเนื่องจากถ่านชาร์นั้นมีส่วนประกอบของออกซิเจนที่น้อยกว่าสารชีวมวลตั้งต้น ดังนั้นหลังจากการผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจึงทำให้ค่าความร้อนมีค่าที่สูงขึ้น

4.4.3 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพ

ตารางที่ 4.9 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ

สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ	จุลสาหร่าย	มหาสาหร่าย	ปาล์ม	ฟาง	นาราเบีย*
ความหนาแน่น 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1119.2	1037	1058	1105	880
ความหนืด 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตก)	3.9	N/A	0.76	0.81	N/A
ซีเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.51	2.29	11.86	16.76	0.04
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.013	N/A	N/A	N/A	N/A
ค่าความเป็นกรดเบส (มิลลิกรัมโพแทสเซียมออกไซด์ต่อกรัม)	46.78	71.43	N/A	N/A	N/A

* หมายเหตุ นาราเบีย เป็นน้ำมันดิบได้รับจากบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

จากตารางที่ 4.10 จะเป็นผลการวิเคราะห์ของสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพจาก จุลสาหร่ายโดยการวัดค่าของความหนาแน่น ความหนืด ซี้เถ้า ปริมาณของของแข็งและความเป็นกรด เบส ซึ่งจะมีการนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่มาจากสารชีวมวลอื่นๆ เช่น มหาสาหร่าย [29] ปาล์ม [40] และฟาง [41] ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

4.4.3.1 ค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียสตามมาตรฐาน ASTM D1298 ของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายมีค่าเท่ากับ 1119.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่มาจากฟางเท่ากับ 1105 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ก็มียังค่าน้อยกว่านาราเบียที่มีค่าเท่ากับ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการวัดค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ก็พบว่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายเท่ากับ 3.9 เซนติสโตร์กมีค่าสูงกว่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพจากปาล์มและฟางที่มีค่าเท่ากับ 0.76 และ 0.81 เซนติสโตร์ก ตามลำดับ

4.4.3.2 ซี้เถ้าและปริมาณของแข็งในน้ำมันชีวภาพ

จากการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งและซี้เถ้าในน้ำมันชีวภาพ โดยทำการหาปริมาณของแข็งด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักของน้ำมันประมาณ 2 ถึง 3 กรัมแล้วนำไปละลายในเอทานอล ร้อยละ 95 หลังจากนั้นก็นำไปกรองสุญญากาศ ซึ่งต้องทำการชั่งกระดาดชกรองก่อนและหลังกรอง จะได้ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในน้ำมันชีวภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.013 โดยน้ำหนัก และสำหรับการวัดปริมาณซี้เถ้าก็นำไปเผาอุณหภูมิสูงจนน้ำมันชีวภาพเหลือเป็นซี้เถ้าร้อยละ 0.51 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำมันชีวภาพจากปาล์มและฟางที่มีซี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 11.86 และ 16.76 โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากสารชีวมวลตั้งต้นจำพวกจุลสาหร่ายนั้นมียังมีองค์ประกอบของเนื้อเยื่อภายในที่มีสมบัติทางความร้อนต่ำกว่าองค์ประกอบของเนื้อเยื่อภายในของชีวมวลจำพวก ลิโนเซลลูโลส [31] จึงทำให้เมื่อมีการผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้วน้ำมันชีวภาพที่ได้จะมีซี้เถ้าเหลืออยู่น้อยตามไปด้วย

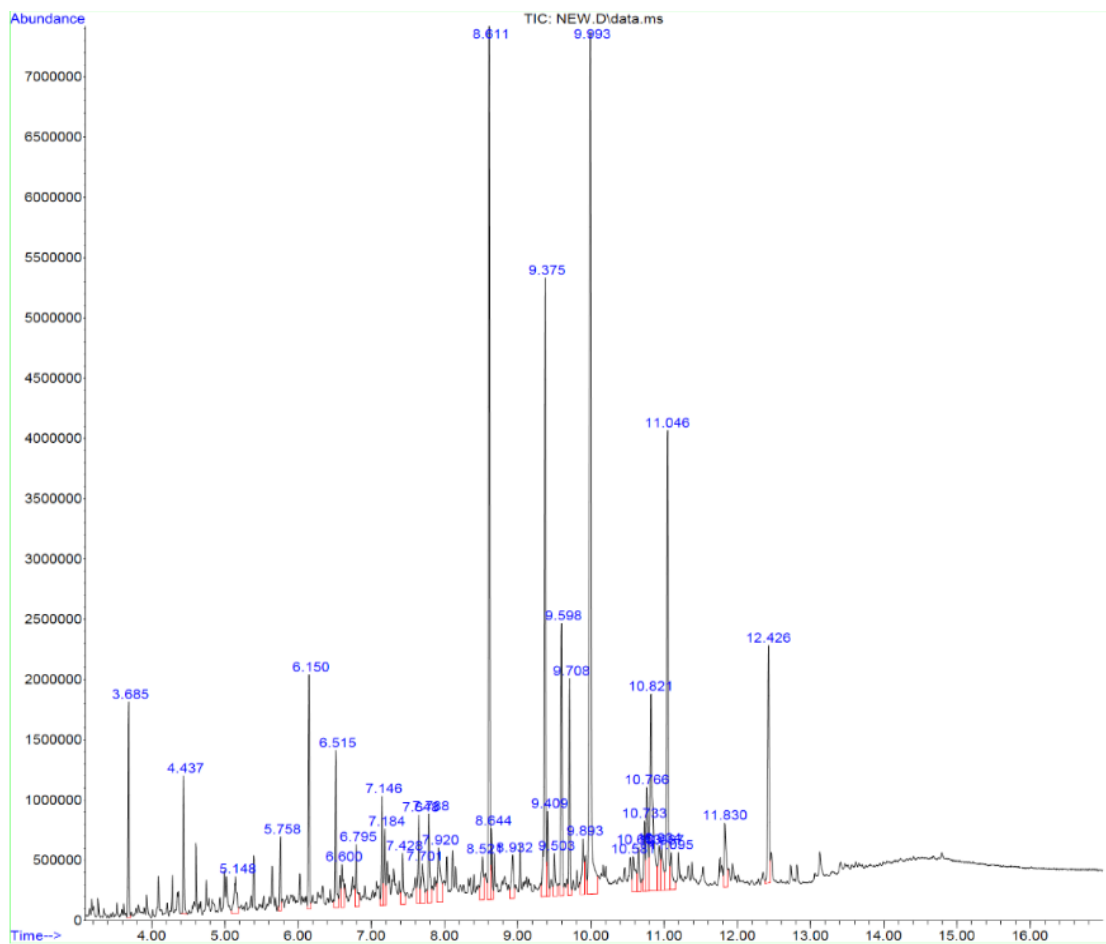
4.4.3.3 ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH and total acid value)

จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด้วยการไตเตรต มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 46.78 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เนื่องจากน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายนั้นมีอนุพันธ์ของ สารประกอบหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่จึงทำให้มีความเป็นกรดสูง และในส่วนของเฟสที่เป็นน้ำมีความความเป็นกรดที่สูงกว่าอยู่ที่ 127.65 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจลสาหร่ายชนิดสาหร่ายสไปรูลีนา โดยเทคนิคเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography mass spectrometry) และ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatography)

4.5.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี



รูปที่ 4.8 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีของน้ำมันชีวภาพจาก จลสาหร่าย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากจลสาหร่ายที่จะแสดงโครมาโทแกรม ดังรูปที่ 4.8 วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี พบว่าองค์ประกอบ ส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพนั้นค่อนข้างซับซ้อนที่ประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของสารประกอบจำพวก ฟีนอล เอไมด์ และคาร์บอกซิลดังแสดงในตารางที่ 4.11 เช่น กรดปาลมิติก (Palmitic acid)

เฮปตะเดคเคน (Heptadecane) ไนท์-ออคตะดีโคน (9-Octadecyne) เฮกซะเดคอะไมด์ (Hexadecanamide) เตตระเดคอะไมด์ (Tetradecanamide) กรดออกตระดีเคไดโนลิก (Octadecadienoic acid) และฟีนอล (Phenol) เป็นต้น ซึ่งเฮปตะเดคเคนและกรดปาลิติกเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรีนี้ เช่นนั้นจึงเป็นผลให้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณของออกซิเจนที่สูงและมีค่าความเป็นกรดกับความหนืดที่สูง

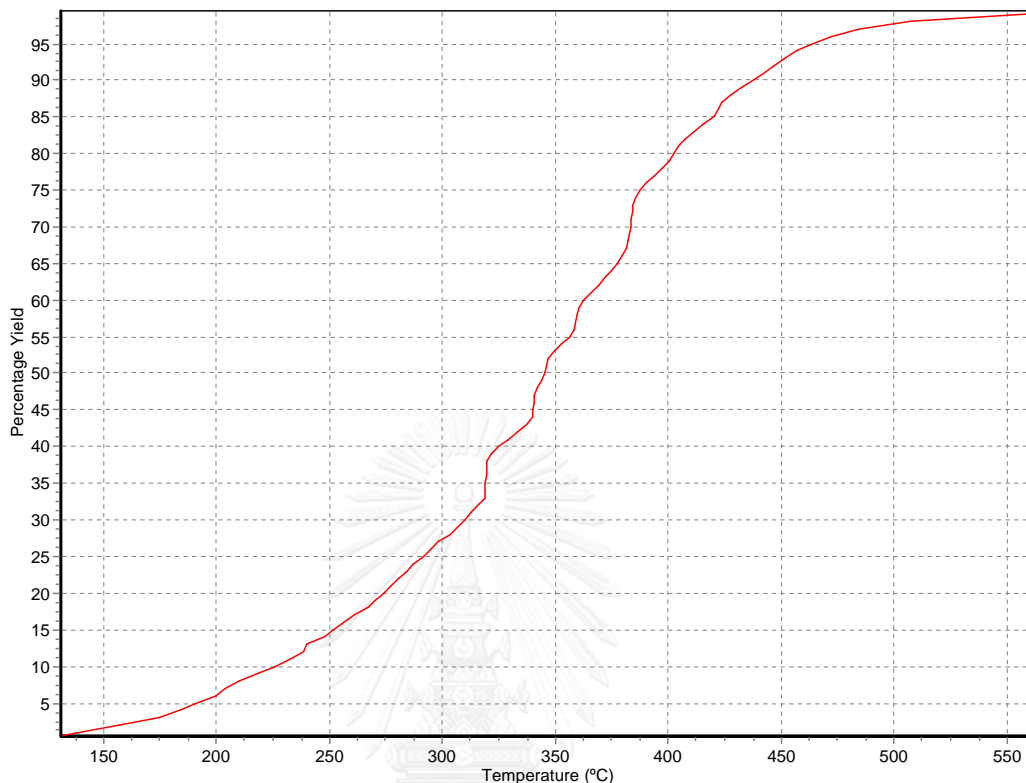
ตารางที่ 4.10 รายชื่อของสารประกอบของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่าย

ลำดับ	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	สูตรโมเลกุล	ชื่อสาร
1	3.685	2.27	C ₆ H ₅ OH	Phenol
2	4.435	1.64	C ₇ H ₈ O	p-Cresol
3	5.15	1.16	C ₈ H ₁₀ O	Phenol, 4-ethyl-
4	5.757	0.9	C ₉ H ₉ N	Benzenopropaneitrile
5	6.152	2.7	C ₈ H ₇ N	Indole
6	6.516	2.12	C ₈ H ₁₀ O ₃	Phenol, 2,6-dimethoxy-
7	6.603	0.97	C ₁₃ H ₁₆	Benzene, 1-methyl-4-[(1-methylethylidene)cyclopropyl]-
8	6.793	1.13	C ₉ H ₉ N	1H-Indole, 3-methyl-
9	7.144	1.43	C ₉ H ₁₂ O ₃	1,2,3-Trimethoxybenzene
10	7.183	1.14	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	trans-Isoeugenol
11	7.426	1.09	C ₁₅ H ₃₂	Pentadecane
12	7.647	1.38	C ₉ H ₁₀ O ₄	Ethanone, 1-(2,6-dihydroxy-4-methoxyphenyl)
13	7.699	1.18	C ₇ H ₆ O ₃	Benzaldehyde, 2,4-dihydroxy
14	7.786	1.65	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl
15	7.92	1.81	C ₁₁ H ₁₇ NO	2-Cyclohexen-1-one, 2-methyl-5-(1-methylethenyl)-, O-methyloxime, (+)-

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) รายชื่อของสารประกอบของน้ำมันชีวภาพจากจุลินทรีย์

ลำดับ	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	สูตรโมเลกุล	ชื่อสาร
16	8.519	1.17	C ₂₁ H ₂₉ NO ₅	1-Ethylamino-3-(2-methoxy-4-methyl-phenoxy)-propan-2-ol
17	8.61	11.34	C ₁₇ H ₃₆	Heptadecane
18	8.644	1.01	C ₈ H ₁₀ S	Benzene, 1-methyl-4-(methylthio)-
19	8.931	1.04	C ₁₃ H ₂₀ O ₂	Olivetol, dimethyl ether
20	9.373	8.49	C ₁₈ H ₃₆	9-Octadecyne
21	9.407	1.27	C ₂₀ H ₄₀	2-Hexadecene, 2,6,10,14-tetramethyl-
22	9.503	0.93	C ₂₀ H ₄₀ O	3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen-1-ol
23	9.598	3.77	C ₁₆ H ₃₂ O	Hexadecanal
24	9.707	3.1	C ₁₅ H ₂₉ N	Pentadecanenitrile
25	9.893	1.38	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	Palmitoleic acid
26	9.993	17.2	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	n-Hexadecanoic acid
27	10.582	1.16	C ₁₄ H ₂₄ O	2(1H)-Naphthalenone
28	10.734	1.1	C ₂₀ H ₄₀ O	Phytol
29	10.764	1.95	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	Gamolenic Acid
30	10.821	6.12	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-
31	10.933	1.2	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	Octadecanoic acid
32	10.968	1.14	C ₁₈ H ₃₅ NO	9-Octadecenamide, (Z)-
33	11.046	7.04	C ₁₆ H ₃₃ NO	Hexadecanamide
34	11.094	0.97	C ₂₂ H ₄₆	Docosane
35	11.831	1.56	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	Methyl 9,12-heptadecadienoate
36	12.425	3.52	C ₁₉ H ₃₈ O ₄	Glycerol 1-palmitate

4.5.2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น



รูปที่ 4.9 โครมาโตแกรมจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่นของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่าย

จากผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลองการกลั่น แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพตามคาบจุดเดือด แสดงผลของโครมาโตแกรม ดังรูปที่ 4.9 พบว่าน้ำมันชีวภาพนั้นจะประกอบไปด้วยเนฟทาร์้อยละ 6.29 โดยน้ำหนัก เคโรซีน ร้อยละ 8.33 โดยน้ำหนัก ดีเซลร้อยละ 47.89 โดยน้ำหนักและน้ำมันหนักร้อยละ 37.50 โดยน้ำหนัก ตามตารางที่ 4.11 ซึ่งส่วนประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 15 ถึง 33 อะตอมที่เป็นดีเซลและน้ำมันหนัก

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบคาร์บอนของน้ำมันชีวภาพจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลอง การกลั่น

ช่วงจุดเดือด (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ร้อยละผลได้โดยน้ำหนัก
IBP - 200	แนฟทา ($C_5 - C_{12}$)	6.29
200 - 250	เคโรซีน ($C_{12} - C_{15}$)	8.33
250 - 370	ดีเซล ($C_{15} - C_{33}$)	47.89
370 - FBP	น้ำมันหนัก ($>C_{33}$)	37.50

จากเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีและแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลอง การกลั่นจะพบว่ามีความสอดคล้องกัน คือ ระบุจำนวนของคาร์บอนภายในสารประกอบตามคาบจุดเดือดของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายว่ามีสารไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่คาร์บอน 15 ถึง 33 ที่เป็นดีเซลและน้ำมันหนัก ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบจำพวกเอไมด์และคาร์บอกซิล นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของคีโตนและฟีนอลจำนวนมากจึงทำให้ปริมาณของออกซิเจนนั้นสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายมีค่าต่ำลง

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย อภิปรายผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุลสาหร่ายชนิดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือสาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina platensis*: *Spirulina sp.*) ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของจุลสาหร่าย

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่าองค์ประกอบของจุลสาหร่ายมีความชื้นร้อยละ 7.07 โดยน้ำหนัก ชี้อ่อนร้อยละ 6.15 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงตัวร้อยละ 5.43 โดยน้ำหนัก และสารระเหยสูงถึงร้อยละ 81.35 โดยน้ำหนัก และสำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบอย่างง่ายแบบแยกธาตุพบว่าจุลสาหร่ายประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 4.36 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.69 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 9.54 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 1.79 โดยน้ำหนัก โดยจุลสาหร่ายนั้นมีค่าความร้อนเท่ากับ 20.83 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่าย

จากการศึกษาค่าการสลายตัวทางความร้อนของจุลสาหร่ายพบว่ามีค่าการสลายตัวสูงสุดที่ 300 องศาเซลเซียสและมีการสลายตัวของสารระเหยภายในจุลสาหร่ายอยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสของจุลสาหร่ายเพื่อให้เพียงพอต่อการแตกตัวอย่างสมบูรณ์

5.1.4 ปัจจัยของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการป้อนสารชีวมวล อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนและขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุลสาหร่ายโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากจุลสาหร่ายโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง ก็คืออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารชีวมวล 0.61 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาทีและขนาดอนุภาคของจุลสาหร่ายเท่ากับช่วง 0.25 ถึง 0.50 มิลลิเมตร จะได้ผลผลิตร้อยละ 42.54 โดยน้ำหนักและมีค่าความร้อน 27.05 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

5.1.5 สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันชีวภาพ

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนเฟสที่เป็นน้ำต่อน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ 5.4:4.5 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบอย่างง่ายแบบแยกธาตุจะพบว่ามีส่วนที่เป็นน้ำจะประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 1.17 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.43 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 11.62 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 4.27 โดยน้ำหนักและสำหรับน้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 4.93 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.66 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 11.47 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 1.26 โดยน้ำหนัก และพบค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ 27.051 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความหนาแน่นที่ 1119.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความหนืดเท่ากับ 3.9 เซนติสโตก ปริมาณของแข็งและซีเถ้าเท่ากับร้อยละ 0.51 และ 0.013 โดยน้ำหนักตามลำดับและค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 46.78 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัม

5.1.6 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีและเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น

5.1.6.1 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี

ในการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี พบว่าน้ำมันชีวภาพมีอนุพันธ์ของสารประกอบจำพวกหมู่เอไมด์และคาร์บอกซิล อาทิเช่น กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) เฮปตะเดเคน (Heptadecane) ไนท์-ออคเตดีไซน (9-Octadecyne) เฮกซะเดคอะไมด์ (Hexadecanamide) เตตระเดคอะไมด์ (Tetradecanamide) และกรดออกตระดีเคไดโนลิก (Octadecadienoic acid) เป็นต้น ซึ่งเฮปตะเดเคนและกรดปาล์มิติกเป็นสารประกอบที่มีมากที่สุด จึงเป็นทำให้น้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายมีอนุพันธ์ของสารประกอบส่วนใหญ่เป็นหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งจะส่งผลให้น้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายมีความเป็นกรดที่สูง นอกจากนี้ยังมีอนุพันธ์ของคีโตนและฟีนอลที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนจึงเป็นเหตุให้ค่าความร้อนนั้นต่ำลง

5.1.6.2 การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบจำลองการกลั่น

น้ำมันชีวภาพจะประกอบไปด้วยแนฟทาร้อยละ 6.29 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 8.33 โดยน้ำหนัก ดีเซลร้อยละ 47.89 โดยน้ำหนัก และน้ำมันหนักร้อยละ 37.50 โดยน้ำหนัก โดยจะมีความสอดคล้องกับเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีที่ระบุจำนวนของคาร์บอน

ภายในสารประกอบตามคาบจุดเดือด ซึ่งสารประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพจากจุลสาหร่ายเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 15 ถึง 33 อะตอมที่เป็นดีเซลและน้ำมันหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในส่วนของตัวแยกผลิตภัณฑ์ของแข็งนั้นมีน้ำมันชีวภาพบางส่วนติดอยู่เนื่องมาจากอุณหภูมิของตัวแยกสารนั้นอยู่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง จึงทำให้น้ำมันชีวภาพที่มีจุดเดือดสูงเกิดการกลั่นตัวอย่างรวดเร็วจึงเป็นผลให้น้ำมันชีวภาพส่วนหนึ่งเกาะติดบริเวณนี้ และสามารถแก้ไขได้โดยการทำให้ตัวแยกสารนี้มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับตัวเครื่องปฏิกรณ์ถึงจะไม่เกิดการเกาะติดของน้ำมันชีวภาพบางส่วน

2. ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะประกอบไปด้วยเฟสที่เป็นน้ำ น้ำมันชีวภาพ จึงจำเป็นต้องกลั่นแยกองค์ประกอบของทั้ง 2 ส่วนออกจากกันก่อน จึงจะสามารถนำน้ำมันชีวภาพที่ได้ไปปรับคุณภาพก่อนใช้งานจริงได้

3. น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความเป็นกรดและปริมาณของออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพที่สูงจึงต้องนำน้ำมันชีวภาพไปทำการปรับสภาวะให้มีค่าความเป็นกรดและลดปริมาณของออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพก่อนที่จะนำไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงต่อไป

4. ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีค่าพลังงานความร้อนอยู่ในระดับหนึ่ง แม้ว่าจะมีความหนาแน่นที่ต่ำ จึงอาจนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อให้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงของแข็งได้

5. แก๊สที่ออกมาจากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นอาจก่อให้เกิดมลพิษเนื่องมาจากในจุลสาหร่ายมีปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง จึงต้องมีกำจัดมลพิษก่อนและแก๊สที่เกิดขึ้นสามารถวนกลับมาเป็นเชื้อเพลิงให้เครื่องปฏิกรณ์ได้

6. ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้เนื่องจากจุลสาหร่ายในประเทศไทยมีกำลังผลิตที่สูงกว่าชีวมวลอื่นๆ และเพาะเลี้ยงได้ง่ายในระดับชุมชน

รายการอ้างอิง

- [1] บริษัท ปตท. จำกัด. ปิโตรเลียม. [ออนไลน์] 19 เมษายน 2559; แหล่งที่: <https://www2.pttep.com/energyliteracy/PTTEP/issue.aspx?id=21>.
- [2] บ้านจอมยุทธ. กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน. [ออนไลน์] 19 เมษายน 2559; แหล่งที่: http://www.baanjommyut.com/library_3/extension-3/biomass/index.html
- [3] นคร ทิพย์าวงศ์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2552, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) ส.ส.ท.
- [4] ตันตยานนท์, ศ., ปิโตรเคมี. 2535, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. น้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ. [ออนไลน์] 10 เมษายน 2559; แหล่งที่มา: <http://www.lesa.biz/earth/lithosphere/fuel/oil>
- [6] สารานุกรมเสรี, ว. พลังงานทดแทน. [ออนไลน์] 3 เมษายน 2559; แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/พลังงานทดแทน>.
- [7] บริษัท เอ็นเนอร์จี เซฟวิ่ง โปรดักส์. ชีวมวล. [ออนไลน์] 15 เมษายน 2559; แหล่งที่มา: <http://www.espthailand.com/article/definition-of-biomass.html>.
- [8] ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, ม., ศักยภาพของชีวมวล. 2549, กรุงเทพฯ: บริษัท คิว พรีนซ์ แมนเนจเม้นท์ จำกัด.
- [9] ศรีนทิพย์, น., ความรู้ทั่วไปของสาหร่าย. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2544, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] Qgi, T., Biomass Handbook. 2002, Ohm-sha: Japan Institute of Energy.
- [11] Hall, D., Biomass for Energy: Supply Prospects. 1993, Washington: In: Renewable Energy, Johansson, T.B. eds., .
- [12] กระทรวงพลังงาน. เทคโนโลยี พลังงานชีวมวล. [ออนไลน์] 5 มีนาคม 2559; แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=127&Itemid=121&lang=th.
- [13] ทิพย์าวงศ์, ร.ด.น., เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2552, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [14] Abnisa, F. and Wan D., A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. Energy Conversion and Management, 2014. 87(0): p. 71-85.

- [15] Fagbemi, L., L. Khezami, and R. Capart, Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. Applied Energy, 2001. 69(4): p. 293-306.
- [16] Liaw, S., et al., Effect of pyrolysis temperature on the yield and properties of bio-oils obtained from the auger pyrolysis of Douglas Fir wood. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012. 93(0): p. 52-62.
- [17] สุดสุข, น., ศ. เกียรติพิงพร, และ ร. ดวงจันทร์, การไพโรไลซิสของใยผลปาล์ม เปลือกเมล็ดกาแฟและไม้. ไพโรไลซิส, 2013. 5(0): p. 1-2.
- [18] Guerrero, M., et al., Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of char characterization and oxidative reactivity. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2005. 74(1-2): p. 307-314.
- [19] Chen, D., J. Zhou., and Q. Zhang., Effects of heating rate on slow pyrolysis behavior, kinetic parameters and products properties of moso bamboo. Bioresource Technology, 2014. 169(0): p. 313-319.
- [20] Zhou, S., et al., Effect of particle size on the composition of lignin derived oligomers obtained by fast pyrolysis of beech wood. Fuel, 2014. 125(0): p. 15-19.
- [21] Jin, H., et al., Leaching of heavy metals from fast pyrolysis residues produced from different particle sizes of sewage sludge. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. 109(0): p. 168-175.
- [22] Basile, L., et al., Influence of pressure on the heat of biomass pyrolysis. Fuel, 2014. 137(0)4.: p. 277-284.
- [23] Luo, G., Fast pyrolysis of beetle-killed trees. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. 110: p. 100-107.
- [24] Jiang, H., et al., Pyrolysis kinetics of spent lark mushroom substrate and characterization of bio-oil obtained from the substrate. Energy Conversion and Management, 2014. 88(0): p. 259-266.
- [25] Yanik, J., et al., Pyrolysis of algal biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013. 103: p. 134-141.
- [26] Wang, X., et al., Comparison of direct and indirect pyrolysis of micro-algae Isochrysis. Bioresour Technology, 2015. 179: p. 58-62.

- [27] Maddi, B., S. Viamajala, and S. Varanasi, Comparative study of pyrolysis of algal biomass from natural lake blooms with lignocellulosic biomass. Bioresour Technology, 2011. 102(23): p. 11018-26.
- [28] Hu, Z., et al., Bio-oil production through pyrolysis of blue-green algae blooms (BGAB): Product distribution and bio-oil characterization. Energy, 2013. 52: p. 119-125.
- [29] Yuan, X., et al., Comparative studies of thermochemical liquefaction characteristics of microalgae using different organic solvents. Energy, 2011. 36(11): p. 6406-6412.
- [30] Li, D., et al., Preparation and characteristics of bio-oil from the marine brown alga *Sargassum patens* C. Agardh. Bioresour Technology, 2012. 104: p. 737-42.
- [31] Ross, A., et al., Classification of macroalgae as fuel and its thermochemical behaviour. Bioresour Technology, 2008. 99(14): p. 6494-6504.
- [32] ศิวัช, ภ., การผลิตน้ำมันชีวภาพจากชี้เลี้ยงยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง. เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ., 2557.
- [33] Stefanidis, S., et al., A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. 105: p. 143-150.
- [34] Wu, S., et al., Cellulose-lignin interactions during fast pyrolysis with different temperatures and mixing methods. Biomass and Bioenergy, 2016. 90: p. 209-217.
- [35] Dror, Y., et al., Pyrolysis/g.c. of oil shales and coal. Fuel, 1985. 64: p. 406-410.
- [36] Sadriye, K., et al., Effect of pyrolysis on the proximate and ultimate analysis of lignite. Thermochimica Acta, 1989. 155: p. 1-6.
- [37] Waheed, Q. and P. Williams, Hydrogen Production from High Temperature Pyrolysis/Steam Reforming of Waste Biomass: Rice Husk, Sugar Cane Bagasse, and Wheat Straw. Energy & Fuels, 2013. 27(11): p. 6695-6704.
- [38] Akhtar, J. and N. Saidina Amin, A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. 16(7): p. 5101-5109.

- [39] Samy, S. Pyrolysis and Bio-Oil. [Online] 10 July 2559 10 July 2559; Available from: <http://www.uaex.edu/publications/pdf/fsa-1052.pdf>.
- [40] เรืองวิไลรัตน์, พ., การผลิตน้ำมันชีวภาพจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยไพโรไลซิสในบรรยากาศไนโตรเจนและไอน้ำ. เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ., 2554.
- [41] ธนกิจธรรมกุล, น., การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. เคมีเทคนิค, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ., 2553.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์องค์ประกอบของจุลสารห่วยและผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธีแบบประมาณ วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาโดย Henneberg และ Stohnmann ในปี ค.ศ 1865 ประเทศเยอรมันนี่ ซึ่งการวิเคราะห์แบบประมาณจะแยกองค์ประกอบของวัตถุดิบเป็นกลุ่มใหญ่ๆ คือ น้ำหรือความชื้น เถ้า ไขมันหยาบ โปรตีนหยาบ เยื่อใยหยาบ แป้งและน้ำตาล สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

1. การวิเคราะห์ความชื้น

วิธีการวิเคราะห์หาความชื้น (Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke: ASTM D3173) จะเป็นที่ยอมรับกันมาก คือ การนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง หรือ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง น้ำจะระเหยกลายเป็นไอออกจากวัตถุดิบ ส่วนที่เหลือจะเรียกว่า วัตถุแห้ง (Dry matter)

อุปกรณ์

- เตาอบ (Oven)
- ถ้วยครุชชีเบิล (Porcelain crucible)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)

วิธีการทดลอง

- ทำการอบถ้วยครุชชีเบิลในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากครุชชีเบิล แล้วนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและจดบันทึกผล
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแล้วนำไปใส่ในครุชชีเบิลประมาณ 1 กรัม ปิดฝาทันทีบันทึกน้ำหนัก
- อบครุชชีเบิลพร้อมตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาจากเตาอบ แล้วทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ต่อมาชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมตัวอย่างและจดบันทึกผล

การคำนวณ

$$\text{Moisture} = \frac{(W_1 \times W_2) \times 100}{W}$$

โดย Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมน้ำหนักตัวอย่างก่อนการอบ (กรัม)

W_1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลที่มีตัวอย่างผ่านการอบ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (กรัม)

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลแห้ง (กรัม)

2. การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke: ASTM D3174) ซึ่งเถ้าจะเป็นส่วนของสารอนินทรีย์ เมื่อนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 550 ถึง 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์นั้นจะถูกเผาไหม้หมดไป เหลืออยู่แต่ส่วนของสารอนินทรีย์

อุปกรณ์

1. เตาเผาอุณหภูมิสูง
2. ถ้วยครุชชีเบล
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. เผาถ้วยครุชชีเบลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาแล้วบันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวลแห้งใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่ชั่ง
3. ใส่ครุชชีเบลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือเผากระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปทิ้งให้เย็นใส่ในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

การคำนวณ

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

โดย Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

W_3 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของถ้ำ (กรัม)

W_4 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างชีวมวลแห้ง (กรัม)

3. การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย (Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke: ASTM D3175) ซึ่งสารระเหยจะเป็นส่วนของสารอินทรีย์ โดยจะนำตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนผ่านเตาเผาแบบท่อ (Tubular furnace) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

อุปกรณ์

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ถ้วยครุชชีเบล
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแห้งใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วจดบันทึกผลของน้ำหนักตัวอย่างแล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
2. ใช้ที่คีบเหล็กคบบถ้วยครุชชีเบล นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผาแบบท่อ อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที
3. หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตาเผาแบบท่อด้วยความระมัดระวังที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
4. หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผาแบบท่อ อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที
5. นำถ้วยครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ทิ้งในโถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที นำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

การคำนวณ

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

โดย Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

W_5 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักชีวมวลก่อนเผา (กรัม)

W_6 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักชิวมวลหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างชิวมวลแห้ง (กรัม)

4. การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัวจะอาศัยหลักการของผลต่างจากปริมาณขององค์ประกอบความชื้น เถ้า และสารระเหย

การคำนวณ

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

โดย Fixed carbon คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

5. การวิเคราะห์หาโปรตีน

โปรตีนประกอบด้วย กรดอะมิโนหลายชนิดและกรดอะมิโนนี้มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนจึงวิเคราะห์ในรูปของปริมาณไนโตรเจน โดยวิธีเจลดาล์ (Kjeldahl) แล้วคำนวณกลับไปเป็นปริมาณโปรตีน โดยตัวอย่างจะถูกย่อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นในสภาพที่มีความร้อน และตัวเร่งปฏิกิริยาจนสารละลายไฮดรอกไซด์จะสลายไป สารประกอบไนโตรเจนทั้งที่เป็นโปรตีนแท้ และไม่ใช่โปรตีน ยกเว้นที่อยู่ในรูปไนเตรทไนโตร จะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ ลงไป แล้วไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแก๊สแอมโมเนียที่กลั่นได้โดยใช้กรดบอริกที่มีความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณเป็นตัวดักจับ นำไปไตเตรทหาไนโตรเจนด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ เพื่อหาปริมาณกรดที่ใช้ทำปฏิกิริยาก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนได้

โดยทั่วไปแล้วโปรตีนมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเฉลี่ย 16 เปอร์เซ็นต์ ($100/16 = 6.25$) ดังนั้นจึงคำนวณหาโปรตีนหายา โดยใช้สูตร

$$\%CP = \%N \times 6.25$$

ในวัตถุประสงค์บางชนิดอาจมีค่าไนโตรเจนแตกต่างกันไป ดังนั้น ค่าแฟคเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามชนิด ตัวอย่างดังแสดงในตาราง

ชนิดของตัวอย่าง	ร้อยละของไนโตรเจน	ค่าแฟคเตอร์
อาหารสัตว์ เนื้อสัตว์	16	6.25
ถั่วเหลือง	17.51	5.71
ถั่วลิสง	18.32	5.46
เมล็ดข้าว	16.81	5.95
นม และผลิตภัณฑ์จากนม	15.68	6.38
ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี	17.15	5.83
รำข้าวสาลี	15.85	6.31
เมล็ดพืชน้ำมัน	18.87	5.30
จมูกข้าวสาลี	17.24	5.80



รูปที่ ก.1 แสดงอุปกรณ์วิเคราะห์โปรตีนประกอบด้วย 2 ส่วน คือ บล็อกย่อยและเครื่องกลั่น
อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การย่อย

2. อุปกรณ์การกลั่น
3. อุปกรณ์การไตเตรท

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์
3. สารละลายบอริก 4 เปอร์เซ็นต์
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยโพแทสเซียมซัลเฟตร้อยละ 98 และคอปเปอร์ซัลเฟตร้อยละ 2
5. สารละลายอินดิเคเตอร์ เมธิลเรด
6. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล (N)

วิธีการทดลอง

เตรียมตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างมาประมาณ 0.5 ถึง 1.0 กรัมอย่างละเอียดใส่ลงในหลอดย่อย
2. ใส่ตะลีสต์ประมาณ 10 กรัม
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไปประมาณ 10 ถึง 15 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบาๆ

การย่อย

4. เปิดเครื่องย่อย แล้วตั้งหลอดย่อยในเครื่อง สวมเครื่องดักจับไอกรดลงบนส่วนบนของหลอดย่อยและเปิดเครื่องดักจับไอกรด โดยทำการย่อยในตู้ดูดควัน
5. กดปุ่ม Start ที่เครื่องย่อย เมื่ออุณหภูมิได้ 420 องศาเซลเซียสแล้ว เครื่องจะทำการย่อยต่อไปอีก 1 ชั่วโมงจนตัวอย่างเป็นสารละลายสีเขียวใส (หากเมื่อครบ 1 ชั่วโมงแล้วยังไม่เป็นสีเขียวใสให้ทำการย่อยต่อ)
6. ยกหลอดย่อยออกมาตั้งพักไว้ให้เย็น
7. ปิดเครื่องย่อย แต่ยังคงเปิดเครื่องดักจับไอกรดไว้เพื่อดักจับไอกรดที่ยังคงเหลืออยู่

การกลั่น

8. เปิดเครื่องหล่อเย็น แล้วเปิดเครื่องกลั่นทำการล้างระบบด้วยการล้างน้ำกลั่น
9. ตวงกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมหยดอินดิเคเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้กลายเป็นสารละลายสีแดงออกชมพู
10. นำหลอดย่อยประกอบเข้ากับเครื่องกลั่นและวางไว้บริเวณแพลตฟอร์ม (Platform) ให้แห้งแก้วจุ่มอยู่ที่กรดบอริก

11. ปิดระบบความปลอดภัยลง เครื่องกลั่นจะทำการกลั่นเป็นเวลาประมาณ 4 นาที
12. เมื่อกลั่นเสร็จแล้วเอาขวดรูปชมพู่ และหลอดย้อยออกจากเครื่อง
13. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ไปไทเทรตกับสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนได้สารละลายเป็นสีชมพูอ่อน
14. คำนวณผลการวิเคราะห์ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} = \frac{14 \times (v1 - v2) \times \text{Normality of HCL (mol / L)} \times 100}{\text{Weight of Sample (g)} \times 1000}$$

เมื่อ $v1$ = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไทเทรตตัวอย่าง

$v2$ = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ไทเทรต blank

เปอร์เซ็นต์โปรตีน = เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน \times Conversion factor

เมื่อ Conversion factor = 6.25

6. การวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน

การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธีโดยตรง (Direct extraction methods) เป็นวิธีการสกัดโดยตรงด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ โดยทั่วไปส่วนประกอบที่เป็นไขมันในอาหารเป็นสารประกอบสกัดออกได้ด้วยตัวทำละลายต่างๆ เช่น อีเทอร์ ปีโตรเลียมอีเทอร์ และไดเอทิลอีเทอร์ ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่มีขั้ว (Non polar solvent) สารสกัดที่ได้เราเรียกว่าไขมันดิบ (Crude fat) เป็นลิปิดอิสระ (Free lipid) ที่พบในอาหารนั้น แต่ถ้าทำการสกัดด้วยเอลกอฮอล์ ส่วนที่สกัดได้จะมีส่วนประกอบอื่นที่ติดอยู่กับไขมันปนอยู่ด้วย

ถ้าต้องการสารสกัดให้ได้ลิปิดทั้งหมดในสารตัวอย่าง ต้องทำการไฮโดรไลส์สารตัวอย่างด้วยกรดหรือด่างอ่อน พวกลิปิดที่รวมอยู่กับสารอื่น เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต จะถูกไฮโดรไลส์ได้เป็นลิปิดอิสระ ทำให้สกัดออกได้ง่าย



รูปที่ ก.2 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน

อุปกรณ์และสารเคมี

1. ตู้อบลมร้อน
2. เครื่องสกัดไขมันแบบซอกซ์เลต (Soxhlet)
3. ปิโตรเลียมอีเทอร์
4. สารตัวอย่าง

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักของพลาสติกสกัดไขมัน แล้วจดน้ำหนักที่แน่นอนไว้ด้วย
 2. ชั่งตัวอย่างอาหาร 5 กรัม (จดน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ทิมเบล (Thimble)
 3. เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในพลาสติกสำหรับสกัดไขมัน 150 มิลลิลิตร จากนั้นนำทิมเบลใส่ลงไป
 4. วางพลาสติกลงในเครื่องสกัดไขมัน ทำการสกัดประมาณ 2 ชั่วโมง
 5. แยกเอาพลาสติกออกจากเครื่องสกัดแล้วใช้คีมคีบทิมเบลที่ใส่ตัวอย่างอาหารออกจากพลาสติก
 6. นำพลาสติกไประเหยเอาปิโตรเลียมอีเทอร์ออก แล้วอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกว่าตัวทำละลายจะระเหยหมด จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก
 7. คำนวณหาปริมาณไขมัน
- $$\text{ร้อยละของปริมาณไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักไขมัน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างอาหาร}} \times 100$$

7. การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์โบไฮเดรตอย่างง่าย

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์โบไฮเดรตอย่างง่ายจะแบ่งคาร์โบไฮเดรตในทางวิเคราะห์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ เยื่อใย (Crude fiber: CF) และไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรก (Nitrogen free extract: NFE)

เยื่อใย หมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้างย่อยได้ยาก เป็นส่วนของผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (แต่ลิกนินไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต) แต่มักอยู่ร่วมกับคาร์โบไฮเดรตในผนังเซลล์พืชช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับพืช สารเหล่านี้ทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างที่สกัดเอาไขมันออกแล้วมาต้มกับสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางภายในเวลาที่กำหนดให้ (10 นาที)
2. ทำการกรองแล้วล้างเอากรดออก จากนั้นนำไปต้มกับด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เจือจาง กรอง และล้างเอาด่างออก กากที่เหลืออยู่คือส่วนของเยื่อใยและเถ้า นำส่วนนี้ไปอบให้แห้งในตู้อบให้ความชื้นระเหยไป ชั่งน้ำหนักไว้แล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
3. ส่วนของเยื่อใยซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะสลายตัวไป เหลือเพียงเถ้า ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำมาหักลบกับของเดิมจะสามารถคำนวณหาปริมาณเยื่อใยได้

ไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกเป็นคาร์โบไฮเดรตพวกน้ำตาล แป้ง เฮมิเซลลูโลสที่ย่อยได้ง่าย แต่อาจมีส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินปนอยู่บ้าง การวิเคราะห์หาไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกทำได้หลายวิธี แต่เป็นการยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลาและเงินทอง ฉะนั้นการวิเคราะห์หาไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกจึงใช้วิธีอ้อม

วิธีการทดลอง

ไปทำการวิเคราะห์หาร้อยละของความชื้น ร้อยละของโปรตีนรวม ร้อยละของไขมันรวม ร้อยละของเยื่อใย และร้อยละของเถ้าก่อน จากนั้นนำร้อยละผลได้ที่วิเคราะห์ได้ดังกล่าวรวมกัน ลบออกจาก 100 ก็จะได้ร้อยละของไนโตรเจนฟรีเอกซ์

$$\% \text{ NFE} = 100 - (\% \text{ น้ำ} + \% \text{ โปรตีนรวม} + \% \text{ ไขมันรวม} + \% \text{ เยื่อใยรวม} + \% \text{ เถ้า})$$

สูตรที่แสดงมาทั้งหมดนี้เป็นการคำนวณปริมาณโภชนะของตัวอย่างในสภาพแห้งตามปกติ (Air dry basis) ถ้าต้องการคำนวณเป็นค่าร้อยละของวัตถุแห้ง (Dry matter basis) คือไม่มีความชื้นอยู่ในตัวอย่างเลย ให้แทนค่าร้อยละของวัตถุแห้งด้วย 100 และค่าของโภชนะอื่นๆ ที่นำมาเข้าสู่สูตรก็ต้องคำนวณไว้เป็นร้อยละของวัตถุแห้งเช่นกัน

ตัวอย่างเช่น หญ้าเนเปียร์เป็นร้อยละของวัตถุแห้งดังนี้

วัตถุดิบ	เถ้า	โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใย
หญ้าเนเปียร์	5.3	7.8	1.1	39.0

$$\text{ดังนั้นมี NFE} = 100 - 5.3 - 7.8 - 1.1 - 39.0 = 46.8 \text{ ร้อยละของวัตถุแห้ง}$$

ประโยชน์ของไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกและเยื่อใย

ไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกเป็นอาหารคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (Soluble carbohydrates) ประกอบด้วย น้ำตาล แป้ง เฮมิเซลลูโลส และบางส่วนของเซลลูโลสและเพนโตแซน (Pentosan) ที่ละลายได้ ฉะนั้นเมื่อสัตว์กินอาหารดังกล่าวเข้าไป ก็จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่าง ๆ ในทางเดินอาหาร แปรสภาพของไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกให้เป็นโมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) ก่อนจะถูกดูดซึมจากทางเดินอาหารเข้าสู่ร่างกาย สำหรับใช้เป็นประโยชน์ให้เป็นพลังงานและความร้อน ในการทำงานต่าง ๆ ของร่างกายให้เป็นปกติ เนื่องจากไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่าย เมื่อมีมากในอาหารใดก็จะทำให้อาหารนั้นมีพลังงานสูง คาร์โบไฮเดรตกลุ่มนี้มีมากใน เมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง ข้าวโพด ในข้าวโพดและข้าวฟ่างมีไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกอยู่ประมาณร้อยละ 70 นอกจากนี้ไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกมีอยู่ในราก และหัวของพืช หญ้าแห้งและอาหารหยาบอื่น ๆ มีไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกต่ำ ส่วนใบและต้นพืชทั้งถั่วและหญ้า มีไนโตรเจนพรีเอ็กซ์แทรกจึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นอาหารหลักของสัตว์พวกเป็ด ไก่ และสุกร

เยื่อใย เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย เซลลูโลส และคาร์โบไฮเดรต ส่วนอื่น ๆ ที่มีความทนทาน ไม่ละลายในกรดและด่างอย่างจาง ในกลุ่มอาหารหยาบ จะมีเยื่อใยสูงกว่าเมล็ดพืช อาหารกลุ่มเยื่อใยจึงจัดเป็นอาหารที่ย่อยได้ยากและเป็นประโยชน์ต่อสัตว์น้อย แต่ในสัตว์บางกลุ่มจะย่อยเยื่อใยได้โดยอาศัยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย จึงสามารถนำเยื่อใยไปใช้เป็นประโยชน์

8. การวิเคราะห์หาปริมาณหาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

เยื่อใยเป็นสารประกอบทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญโดยเฉพาะพืช อาหารสัตว์ สารที่จัดเป็นเยื่อใยในพืชมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเยื่อใยทั้งหมดที่พบในพืชจะประกอบด้วยสารสามชนิดนี้

การวิเคราะห์หาเยื่อใยที่สกัดด้วยกรด (Acid detergent fiber: ADF) ในพืชอาหารสัตว์และวัตถุดิบอาหารสัตว์ ทำโดยนำเอาสารตัวอย่างไปต้มในสารละลายกรด (Acid detergent) ส่วนที่เหลือไม่ละลายคือส่วนของ ADF ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นพวก โคตินและเถ้าที่ไม่ละลายในกรด ดังนั้นส่วนที่หายไป คือ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ในทันที นี้จะใช้กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล และมีสารละลาย (Detergent) คือ ซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรมไนด์ (Cetyl trimethyl ammonium bromide) จะช่วยย่อยพวกโปรตีนออกไป

การหาปริมาณของเซลลูโลส โดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยการสกัดจากสารละลาย (Detergent analysis) หาได้สองวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์หาลิกนิน ถ้าวิเคราะห์หาแบบ ADL ผลต่างระหว่าง

ADF และ ADL (ADF-ADL) คือค่าร้อยละของเซลลูโลสที่มีส่วนของ AIA รวมอยู่ด้วย ถ้าวิเคราะห์โดยวิธี PML ปริมาณของเซลลูโลส คือ (ADF-PML-AIA)

การวิเคราะห์หาลิกนินนั้นทำได้โดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากการหา ADF มาทำการวิเคราะห์หาลิกนิน โดยใช้กรดกำมะถันที่มีความเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลิกนินที่ทำได้โดยวิธีนี้เรียกว่าลิกนินที่สกัดด้วยกรด (Acid detergent lignin) โดยลิกนินไม่จัดเป็นสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต แม้จะมีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แต่ก็จัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชเพื่อให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรง

8.1. วิธีการวิเคราะห์หาเยื่อที่สกัดด้วยสารละลายที่เป็นกลาง (Neutral detergent fiber :NDF)

วิธีการทดลอง

1. นำครุชชีเบลขนาด 50 มิลลิลิตร ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกไปใส่ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและจดบันทึกไว้
2. ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิลิตร 0.5 ถึง 0.1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปากกลมเรียบ ขนาด 600 มิลลิลิตร (ใส่กรดซัลฟูริกประมาณ 0.5 กรัม ในตัวอย่างที่มีไคตินสูง ลงไปในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างใบเดิม)
3. นำสารละลายที่เป็นกลางที่ใช้สกัดเยื่อ (Neutral detergent fiber) ไปต้มให้ร้อนประมาณ 5 นาที แล้วตวงใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างอยู่ 50 มิลลิลิตรโดยใช้กระบอกลง นำไปทำการย่อย หลัง 5 นาที เขย่าบีกเกอร์ แล้วยกลงในตัวอย่างที่กรองยากจะเต็ม 0.1 มิลลิลิตร สารละลายมาตรฐานแอลฟาอะไมเลส (α -amylase) เขย่าให้สารละลายมาตรฐานแอลฟาอะไมเลส กับสารละลายที่เป็นกลางผสมกัน แล้วยกขึ้นวางบนเครื่องวิเคราะห์เยื่อ ทำการรีฟลักซ์ (Reflux) ต่อ 60 นาที
4. ทำการกรอง โดยเทสารละลายในบีกเกอร์ ลงในครุชชีเบลที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ในบีกเกอร์ด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่เหลือทั้งหมดลงในครุชชีเบลจนหมด
5. ล้างตัวอย่างในครุชชีเบลด้วยน้ำร้อนอีกจนหมดฟอง แล้วใช้ขวดฉีดน้ำร้อนล้างตัวอย่างที่อยู่ติดข้างครุชชีเบลลงให้หมด แล้วดูน้ำในครุชชีเบลออก
6. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตน (Acetone) 3 ถึง 5 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายล้างออกจากครุชชีเบลไม่มีสี
7. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมงหรือตลอดคืน

8. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้ง แล้วเอาไปใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น หลังจากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า NDF

9. นำครุชชีเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

10. เอาออกใส่โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักของถ้ำ

การคำนวณ

1. ในกรณีที่มีตัวอย่างนี้วิเคราะห์หาเฉพาะค่า NDF

$$\%NDF = \frac{[(W1-W2) \times 100]}{W3} - \% \text{Neutral insoluble ash}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของสารตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

%NDF insoluble ash คือ ร้อยละของถ้ำที่ได้จากขั้นตอนการเผาการวิเคราะห์หา NDF

2. ในกรณีที่มีตัวอย่างนี้วิเคราะห์หาค่าของลิกนินด้วย

$$\%NDF = \frac{[(W1-W2) \times 100]}{W3} - \% \text{Acid insoluble ash}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของสารตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

%Acid insoluble ash คือ ร้อยละของถ้ำที่ได้จากขั้นตอนการเผาการวิเคราะห์หาลิกนิน

$$\%NDS = 100 - (\%Moisture) - (\%NDF)$$

8.2 วิธีการวิเคราะห์หาเยื่อใยที่สกัดด้วยสารละลายกรด Acid detergent fiber (ADF)

วิธีการทดลอง

1. นำครุชชีเบลขนาด 50 มิลลิลิตร ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกไปใส่ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและจดบันทึกไว้

2. ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียดขนาด 1 มิลลิเมตร ประมาณ 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปากกลมเรียบขนาด 600 มิลลิลิตร

3. นำสารละลายกรด (Acid detergent) ไปต้มให้ร้อน ตวงใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างอยู่ 100 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง นำไปทำการย่อยหรือรีฟลักซ์ นาน 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เยื่อในชนิดควบคุมเอง

4. ทำการกรอง โดยเทสารละลายในบีกเกอร์ ลงครุชชีเบลที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่องกรองดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ในบีกเกอร์ด้วยขวดฉีดย้ำร้อน จนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่เหลือทั้งหมดลงในครุชชีเบลจนหมด ล้างตัวอย่างที่อยู่ในครุชชีเบลขนาด 1,200 มิลลิลิตร หรือจนหมดฟอง

5. ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ข้างครุชชีเบลด้วยน้ำร้อนอีก 1 ถึง 2 ครั้ง โดยใช้ขวดฉีดย้ำร้อน แล้วดูดน้ำออกด้วยปั๊มสุญญากาศ

6. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตน 3 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจากครุชชีเบลไม่มีสี

7. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน

8. นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบ เอาใส่โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ADF

9. นำครุชชีเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

10. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหาค่า

การคำนวณ

1. ในกรณีที่ตัวอย่างนี้วิเคราะห์หาเฉพาะค่า ADF

$$\%ADF = \frac{[(W1-W2) \times 100]}{W3} - \% \text{Neutral insoluble ash}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของสารตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

% Neutral insoluble ash คือ ร้อยละของเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผาการวิเคราะห์หา ADF

2. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาค่าของลิกนินด้วย

$$\%ADF = \frac{[(W1-W2) \times 100]}{W3} - \% \text{ Acid insoluble ash}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของครุชิลรวมกับน้ำหนักของสารตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักของครุชิล

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

%Acid insoluble ash คือ ร้อยละของเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผารวิเคราะห์หาลิกนิน

การคำนวณหาปริมาณของเฮมิเซลลูโลส

$$\text{ร้อยละของเฮมิเซลลูโลส} = \%NDF - \%ADF$$

8.3 วิธีการวิเคราะห์หาลิกนินที่สกัดด้วยสารละลายกรด Acid detergent lignin (ADL)

วิธีเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์

1. ตวงกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาณ 670 มิลลิลิตร เทอย่างช้าๆ ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว 100 มิลลิลิตร พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเข้ากันเป็นระยะ ในขณะที่เตรียมสารละลายนี้ต้องให้บีกเกอร์อยู่ในอ่างน้ำเย็นตลอดเวลา
2. นำกระจกนาฬิกาปิดไว้ รอจนสารละลายเย็นตัวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
3. เมื่อสารละลายเย็นลง เติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ปริมาณ 1 ลิตร คนสารละลายให้เข้ากันอีกครั้งเอากระจกนาฬิกาปิดไว้ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
4. เมื่อสารละลายเย็นลง เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ มาใช้จะต้องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายนี้ให้ได้ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในการวัดหาความถ่วงจำเพาะ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนั้น เริ่มจากวางขวดสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ ลงในอ่างน้ำเย็น ใช้ปรอทวัดอุณหภูมิ พออุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ยกขึ้นจากอ่างน้ำเย็นเขย่าสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ในขวดเก็บสารละลายให้เข้ากัน แล้วเทลงในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ใช้เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะวัดให้ได้เท่ากับ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ถ้าค่าที่วัดได้สูงกว่า 1.634 ให้ค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไป แต่ถ้าต่ำกว่า 1.634 ให้เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป จนกว่าจะวัดได้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จึงจะนำไปใช้ได้

วิธีการทดลอง

1. นำครุชิวีลที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ที่เย็น ลงไปประมาณครึ่งครุชิวีลจากนั้นนำไปวางลงในภาตสเดนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่ว เพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน โดยมีน้ำกลั่นที่อยู่ในภาตสเดนเลสระดับที่ต่ำกว่าระดับของแผ่นแก้ว รักษาอุณหภูมิของครุชิวีลในภาตสเดนเลสที่ 20 – 23 องศาเซลเซียส

2. คอยเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสารละลายในครุชิวีลแห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลาย่อยนาน 3 ชั่วโมง

3. จากนั้นนำไปซัดชัน (Suction) เพื่อล้างสารละลายกรดออก แล้วล้างด้วยน้ำร้อน โดยใช้ความร้อนปริมาณ 1,400 มิลลิลิตร หรือจนกรดหมดไป จากนั้นใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ไล่ตัวอย่างที่ติดอยู่ข้างครุชิวีลให้ลงไปในครุชิวีลให้หมด แล้วฉีดล้างครุชิวีลอีกครั้ง

4. นำครุชิวีลพร้อมตัวอย่างที่ย่อยแล้ว ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกใส่โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและจดบันทึกค่าไว้

การคำนวณหาร้อยละของเซลลูโลส

$$\text{ร้อยละของเซลลูโลส} = \frac{(W1-W4) \times 100}{W3}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของครุชิวีลรวมกับน้ำหนักของสารตัวอย่าง ADF

W4 คือ น้ำหนักของครุชิวีลรวมกับน้ำหนักของเยื่อใยหลังการอบ

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

8.4 วิธีการวิเคราะห์หาลิกนิน

วิธีการทดลอง

1. นำครุชิวีลที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หาเซลลูโลสแล้ว นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. เอาออกไปใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น แล้วนำไปชั่งน้ำหนักหาลิกนิน

การคำนวณหาร้อยละของลิกนิน

$$\text{ร้อยละของลิกนิน} = \frac{[(W4-W5) \times 100]}{W3}$$

W3

เมื่อ W4 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของเยื่อใยหลังการอบ

W5 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของเยื่อใยหลังการเผา

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

$$\text{ร้อยละของเถ้าที่ไม่ละลายในกรด} = \frac{[(W5-W2) \times 100]}{W3}$$

W3

เมื่อ W2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลเปล่า ก่อนนำมาใช้วิเคราะห์หา ADF

W5 คือ น้ำหนักของครุชชีเบลรวมกับน้ำหนักของเยื่อใยหลังการเผา

W3 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer)

เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic elemental analyzer) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ ในเครื่องมือบางรุ่นสามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ (S) ได้ด้วย

หลักการการทำงานของเครื่องมือในการหาปริมาณธาตุเหล่านี้อาศัยการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างไปเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ อย่างมีสัดส่วนที่แน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ธาตุคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และธาตุไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ (H_2O) จากนั้นจึงแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิดต่อไป

ระบบเครื่องมือ CHN analyzer อาจแตกต่างกันไปในแต่ละบริษัทผู้ผลิต เช่น

เครื่อง Elemental analyzer model EA NA 1500 ของบริษัท Carbo Erba-Thermo Fisher Scientific

ในการวิเคราะห์จะชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างมาในช่วง 2 ถึง 3 มิลลิกรัม (มากที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิกรัม) และห่อด้วยแผ่นดีบุกบาง ๆ (Tin foil) เป็นแคปซูลเล็ก ๆ และนำไปใส่ในเครื่องสุ่มตัวอย่างอย่างอัตโนมัติ (Autosampler) จากนั้นแคปซูลของตัวอย่างข้างต้นจะถูกนำไปหย่อนลงในหลอดเผาไหม้ (Combustion tube) ที่ทำจากควอทซ์หรือเหล็กกล้าซึ่งให้อุณหภูมิสูงถึง 1,020

องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียมซึ่งไหลผ่านตลอดเวลา จากนั้นจึงนำแก๊สออกซิเจนผ่านเข้ามา ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับดีบุกได้ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) พร้อมกับคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงถึง 1,800 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น คาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนและออกไซด์อื่น ๆ ของไนโตรเจน ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สผสมของแก๊สไนโตรเจน แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ไอน้ำ แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะถูกพาโดยแก๊สฮีเลียมไหลผ่านหลอดที่มีลวดทองแดงตัดเป็นชิ้นเล็กๆ บรรจุอยู่ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส จะทำให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์เปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนและเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ขึ้น จากนั้นจะผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยใยลวดเงิน (silver wool) ซึ่งใช้จับแก๊สของธาตุซัลเฟอร์และเฮไลต์ต่าง ๆ จากนั้นจึงแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจนโดยใช้คอลัมน์โครมาโทกราฟี (Chromatographic column: Porapak QS) โดยจะให้แก๊สไนโตรเจนถูกพาออกมาก่อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะตรวจวัดได้โดยตัวตรวจวัดเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal conductivity detector: TCD) ได้โครมาโตแกรม การหาปริมาณจะทำได้โดยเทียบกับการวิเคราะห์สารมาตรฐานที่ทราบปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนที่แน่นอน ในระบบดังกล่าวนี้จะเห็นว่ามีแก๊สที่กักก่อนไปเป็นแก๊สที่ไม่กักก่อนเสียก่อนที่จะทำการแยกและวิเคราะห์หาปริมาณโดยใช้ตัวตรวจวัดได้โดยตัวตรวจวัดเหนี่ยวนำความร้อน เนื่องจากลวดของตรวจวัดได้โดยตัวตรวจวัดเหนี่ยวนำความร้อน มีขนาดเล็กมากอาจถูกกักก่อนจนขาดได้ง่าย

เครื่อง 2400 CHN elemental analyzer ของบริษัท Perkin Elmer

เครื่องมือมีหลักการวิเคราะห์คล้าย ๆ กันกับที่กล่าวมาข้างต้น ในการวิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณประมาณ -2 มิลลิกรัมจะถูกบรรจุในแคปซูลดีบุกและนำไปวางในระบบสุ่มตัวอย่างอัตโนมัติ จากนั้นจะถูกนำไปหย่อนลงในส่วนพักให้ปฏิกิริยา (Reaction chamber) ที่มีออกซิเจนมากเกินพอที่อุณหภูมิประมาณ 990 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจจะเกิดแก๊สต่างๆ รวมทั้งเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้นบ้างแม้จะมีออกซิเจนมากเกินพอ และจะเกิดออกซิเดชันโดยสมบูรณ์เมื่อผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุทั้งสแตนไดรอกไซด์ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะให้แก๊สผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และไนโตรเจนออกไซด์ รวมทั้งออกซิเจนที่เกินพอเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไหลผ่านท่อซิลิกา (Silica tube) ที่บรรจุด้วยผงโลหะทองแดง (Copper granules) ซึ่งบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งออกซิเจนที่เหลือเข้ามาจะถูกจับไว้ และไนโตรเจนออกไซด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจน จากนั้นอาจมีคอลัมน์สำหรับจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สเฮไลต์ ก่อนที่แก๊สผสมจะถูกพาโดยแก๊สฮีเลียมไปยังส่วนพักสาร (Chamber) ที่ควบคุมปริมาตรและความดัน และจะถูกนำไปผ่านการแยกด้วยระบบโซนโครมาโทกราฟี (Zone chromatography) ซึ่งจะให้สัญญาณออกมาในรูปแบบขั้นบันได (Staircase) ความสูงของขั้นบันไดจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของแก๊สต่าง ๆ ที่ถูกแยก

ออกมา จึงสามารถหาปริมาณได้โดยเทียบกับสารมาตรฐาน โดยมีตัวตรวจจับแบบจำกัด (Detection limit) สำหรับกรณีใช้สารตัวอย่าง 2 ถึง มิลลิกรัม อยู่ที่ประมาณ 3 ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (~500 ppm) โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ $0.02 \pm$ โดยน้ำหนัก

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครมาโทกราฟี เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหยได้ง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) และกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ปานกลาง (Semi-volatile organic compounds)

หลักการของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ใช้เทคนิคการแยกองค์ประกอบของสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบของสารผสมบนเฟสคงที่ (Stationary phase) ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) สำหรับเครื่อง GC เฟสคงที่คือ สารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ส่วนเฟสเคลื่อนที่คือ แก๊สฮีเลียม เมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สารดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส และส่วนแก๊สของสารผสมจะถูกพาเข้าสู่คอลัมน์โดยแก๊สฮีเลียม ซึ่งภายในคอลัมน์จะเกิดการแยกสารผสม (Separation) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยา (Interaction) ระหว่างสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ (Stationary phase) และสารผสม ทั้งนี้ในแยกสารผสมให้เป็นสารเชิงเดี่ยวนั้น อาศัยความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล จุดเดือด โครงสร้างของสาร และสมบัติทางเคมีในการทำปฏิกิริยากับสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ซึ่งหลังจากที่ สารแต่ละชนิดถูกแยกเป็นส่วนๆ จะเคลื่อนที่อยู่ภายในคอลัมน์ในเวลาที่แตกต่างกัน จากนั้นสารเชิงเดี่ยวแต่ละชนิดจะผ่านเข้าสู่อุปกรณ์วัดสัญญาณ (Detector) และแปรผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) ซึ่งสารเชิงเดี่ยว แต่ละสารจะมีระยะเวลาที่อยู่ในคอลัมน์ (Retention time, RT) เฉพาะตัว ในการวิเคราะห์ผลจะนำพื้นที่ใต้พีค (Peak) ของแต่ละสารมาวัด คำนวณผลเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ก็จะทราบปริมาณของสารตัวอย่างได้

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สตัวพาพา (Carrier gases) เพื่อจะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ในตัวตรวจวัดเอฟไอดี (Flame ionization detector: FID)
 - 1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนในตัวตรวจวัดเอฟไอดี

2. ตัวระบายแก๊ส (Gas traps) และฟิลเตอร์ (Filters) เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งาน สะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบปลอกกระสุน (Cartridge) คือ

2.1 ตัวระบายคัดขนาดโมเลกุล (Molecular Sieve Trap) ใช้ดูดความชื้น

2.2 ตัวระบายออกซิเจน (Oxygen trap) เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

2.3 ฟิลเตอร์ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon filter) ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของ น้ำมันสำหรับ แก๊สตัวพาควรจะต้องผ่านฟิลเตอร์ธรรมดา อากาศควรจะต้องผ่านฟิลเตอร์แบบถ่าน

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สาร ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ

5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจาก ทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้ สนิม อาจอยู่ในรูปท่อตัวยู (U-tube) ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1 ถึง 2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner diameter) 3-6 มิลลิเมตร อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการ แยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 คอลัมน์ที่มีเฟสหุดยุคหนึ่ง)Wall-coated open tubular: WCOT) เป็นของเหลวเคลือบ เป็นฟิล์ม บางๆ 1-0.1ไมครอน อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ (10 ถึง 100 เมตร

5.2 คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายใน (Support coated open tubular: SCOT) ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร

5.3 คอลัมน์ขนาดเล็ก (Micropacked column) มีความยาวประมาณ 0.7 ถึง 1.0 เมตร

6. ตัวตรวจวัดเอฟไอเดตินั้น สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็น ไอออน ภายในตัวตรวจวัดมี ขั้ว ไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิดเอฟไอเดิตินี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด

แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatograph-mass spectrometer : GCMS)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ถือเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง มากในการวิเคราะห์หาสารประกอบอินทรีย์ประเภทต่างๆ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อการ วิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่ต้องการความแม่นยำสูง สามารถเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับ ฐานข้อมูล (Library) เพื่อความถูกต้องได้โดยไม่ต้องใช้สารมาตรฐาน ซึ่งถือเป็นข้อดีของเทคนิค

ของเครื่องมือทั้ง 2 ประเภท คือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer)

หลักการทำงานในส่วนเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีอาศัยเทคนิคการแยกองค์ประกอบของสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบของสารผสมบนเฟสคงที่ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่สำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เฟสคงที่ คือ สารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ส่วนเฟสเคลื่อนที่ คือ แก๊สฮีเลียม เมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สารดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สและส่วนแก๊สของสารผสมจะถูกพาเข้าสู่คอลัมน์โดยแก๊สฮีเลียม ซึ่งภายในคอลัมน์จะเกิดการแยกสารผสมโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่อยู่ภายในคอลัมน์และสารผสม จากนั้นโมเลกุลของสารเชิงเดี่ยวจะถูกพาเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์

ซึ่งเมื่อสารเชิงเดี่ยวเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ โมเลกุลของสารเชิงเดี่ยว จะได้รับพลังงานจากลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูง ที่ค่า 70 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปประจุ เรียกว่าไอออนโมเลกุลาร์ (Molecular ion: M⁺ or M⁻)

รูปแบบการแตกตัวของแต่ละโมเลกุลมีลักษณะเฉพาะ เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) โดยจะแสดงการแตกตัว (Fragmentation) ในรูปของสัดส่วนของมวลต่อประจุ (Mass-to-charge ratio: m/z)

แก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulation distillation gas chromatography: SDGC)

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์แบบจำลองการกลั่น (Simulation distillation: SIMDIST) เป็นวิธีการทางแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการอธิบายลักษณะส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งจะจำลองการกระจายช่วงของจุดเดือดของปิโตรเลียม ซึ่งทำให้สามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็ว โดยตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยคอลัมน์แก๊สโครมาโทกราฟีแบบไม่มีขั้ว (Non-polar) เพื่อแยกชนิดของสารไฮโดรคาร์บอนตามจุดเดือดซึ่งจะสัมพันธ์กับรีเทนชันไทม์ (Retention time) และเมื่อนำมาพอร์ตเป็นกราฟแล้วโครมาโตแกรมที่ได้จะถูกนำมาประมวลเป็นผลแบบจำลองการกลั่น ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีที่รวดเร็วและสะดวกกว่ามาก เมื่อเทียบกับการทดสอบโดยการกลั่นแบบดั้งเดิม

ภาคผนวก ข.

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส

หลักการคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว:

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว (Daf)} = 100 \times \left[\frac{W_{\text{liquid}}}{W_{\text{daf}}} \right]$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง:

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (Daf)} = 100 \times \left[\frac{W_{\text{solid}}}{W_{\text{daf}}} \right]$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊ส:

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊ส (Daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว} - \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

โดย W_{daf} คือ น้ำหนักเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น

W_{liquid} คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว

W_{solid} คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ปราศจากความชื้น

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศรัณร์พงศ์ คำศรีสุขต์ เกิดวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ.2533 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพะเยาพิทยาคม จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2555 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555

