

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล



นิത്യธินันท์ บริรักษ์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พฤษภาคม 2558

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

นิตยธินันท์ บริรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยเชียงใหม่เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พฤษภาคม 2558

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

นิตยธินันท์ บรรีรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบ

อาจารย์ที่ปรึกษา

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ทิพย์วงศ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก่งกมล รัตน์เกษม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อจหาญ)

21 พฤษภาคม 2558

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่



แต่
บุพการี และ บุรพจารย์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จัชวาลย์ ชัยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบโอกาสในการศึกษา การให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้าน การแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ทิพย์วงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก่งกมลรัตน์เกษม ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจโครงร่างวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังเป็นอาจารย์ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนการให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนในหลายๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อาจหาญ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอก และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบ พระคุณ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนการวิจัย เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง และสถานที่สำหรับดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่นิเพลิน บริรักษ์ คุณแม่อารีย์ เครื่องคำ และครอบครัวที่ให้การศึกษาคือคอยสนับสนุน ให้คำแนะนำต่างๆ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจในด้านการเรียน และการดำเนินชีวิตมาโดยตลอด

ขอบคุณภรรยา คุณศิริรัตน์ กันทะวงศ์ และบุตรชายอันเป็นที่รัก เด็กชายบุรินทร์ บริรักษ์ ที่คอยดูแลอยู่เคียงข้างเป็นกำลังใจ และแรงผลักดันให้ก้าวไปสู่จุดมุ่งหมายอันสูงสุดของชีวิตต่อไป

สุดท้ายหากวิทยานิพนธ์เรื่องนี้มีคุณค่า และประโยชน์สำหรับนักศึกษาในทุกระดับ ผู้เขียนขอขอบคุณดีทั้งหมดทุกประการ ให้แก่ผู้มีพระคุณดังที่ได้กล่าวมา แต่หากมีส่วนหนึ่งส่วนใดบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงและขอน้อมรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์เหล่านั้น

นิตยธินันท์ บริรักษ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือก
เมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ผู้เขียน

นาย นิตยธินันท์ บริรักษ์

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว โดยการศึกษาได้ใช้ของผสมระหว่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:10 เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศา/นาที่ ในรูปแบบที่ไม่มีการใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต 5 wt.% ทำปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 3 อุณหภูมิ คือ 200 250 และ 300 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาหลังจากที่อุณหภูมิถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้ 4 เวลา คือ ณ ที่เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา 60 120 และ 180 นาที พร้อมทั้งศึกษาร้อยละของผลผลิตที่ได้ (%Yield) ค่าความร้อนสูง (HHV) วิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว คือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา จะได้ปริมาณผลผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง และ ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ที่ร้อยละ 32.33 37.43 และ 30.24 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานร้อยละ 57.53 และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติในแบบประมาณ พบว่า เชื้อเพลิงเหลวประกอบไปด้วย สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และจีเอ็ม ประเมินร้อยละ 91.36 7.40 0.95 และ 0.29 ตามลำดับ และการวิเคราะห์คุณสมบัติในแบบแยกธาตุ พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ในปริมาณร้อยละ 78.22 9.79 9.80 และ 0.31 ตามลำดับ ทั้งนี้เชื้อเพลิงเหลวมีสูตรเคมีอย่างง่าย คือ $\text{CH}_{1.909}\text{O}_{0.120}\text{N}_{0.004}$ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3.30 ± 0.06 และมีค่าความร้อนสูง 40.90 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันเตา (42.10 MJ/kg) และน้ำมันดีเซล (42-46 MJ/kg)

Thesis Title	Suitable Conditions for Liquid Fuel Production from Cashew Nut Shell Using Hydrothermal Process
Author	Mr. Nitthinan Borirak
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Advisor	Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana

ABSTRACT

This research studied about the investigated parameters for liquid fuel production from Cashew Nut Shell (CNS) using Hydrothermal Process (HTP) without catalyst. HTP experiments were performed at 10% solid concentrations and heating rate at 4 degree/min. Parameters investigated are with and without 5 wt.% Na_2CO_3 catalyst, temperature (200, 250 and 300 °C) and retention time (0, 60, 120 and 180 min). Output from the experiments were tested for yields of products, high heating values (HHV), energy efficiency, proximate and ultimate analysis.

It was found that HTP conversion at temperature 200 °C, without catalyst and the shortest retention time produced the highest amount of liquid fuel. Output ratio of liquid fuel, solid fuel and gas and organics soluble is 32.33, 37.43 and 30.24 wt.% respectively. The energy recovery is 57.53%. The composition of the liquid fuel by proximate analysis are Volatile matter, Fixed carbon, Moisture and Ash is 91.36 7.40 0.95 and 0.29 respectively and ultimate analysis are C, H, O and N is 78.22 9.79 9.80 and 0.31 respectively. The liquid fuel empirical formula and pH is $\text{CH}_{1.909}\text{O}_{0.120}\text{N}_{0.004}$ and 3.30 ± 0.06 respectively. The liquid fuel obtained from the HTP has similar HHV to that of fuel oils and diesel oil with HHV of 40.90 MJ/kg compared to 42.10 MJ/kg and 42-46 MJ/kg respectively.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
รายการสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
1.4 ทฤษฎี และหลักการ	16
1.5 ขอบเขต และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	56
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	64
บทที่ 2 วิธีการดำเนินงานวิจัย	65
2.1 การออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	65
2.2 การจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	72
2.3 เครื่องมือตรวจวัดและวิเคราะห์	80
2.4 ขั้นตอนการตรวจวัด และการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้	93
บทที่ 3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	101
3.1 การทดสอบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	101
3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	อุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลว	111
3.4	อุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว	113
3.5	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน	114
3.6	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน	116
3.7	การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว	118
3.8	การวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็ง	122
3.9	การวิเคราะห์ก๊าซ	124
3.10	การวิเคราะห์สารประกอบของน้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้	125
3.11	การวิเคราะห์สมดุลมวลของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	127
3.12	การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	132
บทที่ 4	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	144
4.1	สรุปผลการวิจัย	144
4.2	ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัย	145
เอกสารอ้างอิง		146
ผลงานการประชุมวิชาการ		152
ภาคผนวก ก.	การวิเคราะห์สูตรเคมีอย่างง่าย	162
ภาคผนวก ข.	การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	165
ภาคผนวก ค.	การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง	168
ภาคผนวก ง.	การวิเคราะห์ทางด้านพลังงาน	171

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	175
ภาคผนวก ฉ. การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	176
ภาคผนวก ช. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	196
ภาคผนวก ซ. การวิเคราะห์ค่าความเค้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง	207
ภาคผนวก ฌ. การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์	209
ภาคผนวก ญ. รายละเอียดคุณสมบัติของถังปฏิกรณ์แรงดันสูง	227
ประวัติผู้เขียน	228

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 แสดงการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	13
ตารางที่ 1-2 แสดงการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	13
ตารางที่ 1-3 แสดงปริมาณองค์ประกอบของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และของเสียอื่นๆ [28]	18
ตารางที่ 1-4 คุณสมบัติและองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	22
ตารางที่ 1-5 คุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	23
ตารางที่ 1-6 คุณสมบัติและองค์ประกอบของเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	25
ตารางที่ 1-7 รายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิกวิดเฟรกชัน	30
ตารางที่ 1-8 รายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน	31
ตารางที่ 1-9 คุณสมบัติของน้ำ ที่เจือปนไขมันต่างๆ [28]	35
ตารางที่ 3-1 ค่าความเค็มที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิต่างๆ	105
ตารางที่ 3-2 แสดงปริมาตรจำเพาะ สถานะของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ และค่าคุณภาพไอน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ	106
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ที่เจือปนไขมันต่างๆ	107
ตารางที่ 3-4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	110
ตารางที่ 3-5 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	119
ตารางที่ 3-6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	122
ตารางที่ 3-7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	124
ตารางที่ 3-8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	126
ตารางที่ ก-1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบแยกธาตุของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	162
ตารางที่ ก-2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	163

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข-1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	165
ตารางที่ ข-2 การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	167
ตารางที่ ค-1 สรุปผลการคำนวณค่าคุณภาพไอน้ำ และปริมาณของผสมอิมิตัวในแต่ละสถานะ	169
ตารางที่ ง-1 สรุปผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ และประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	173
ตารางที่ ง-2 สรุปผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่งปฏิกรณ์ความดันสูง	174
ตารางที่ จ-1 สรุปผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	175
ตารางที่ ฉ-1 แสดงสมมูลพลังงานในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	177
ตารางที่ ฉ-2 แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C ที่เวลาต่างๆ	183
ตารางที่ ฉ-3 แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 250 °C ที่เวลาต่างๆ	185
ตารางที่ ฉ-4 แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C ที่เวลาต่างๆ	187
ตารางที่ ฉ-5 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ	194
ตารางที่ ฉ-6 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ	194
ตารางที่ ฉ-7 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ	195
ตารางที่ ฉ-8 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ	195

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ช-1 พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น	196
ตารางที่ ช-2 พลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย	197
ตารางที่ ช-4 พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้	198
ตารางที่ ช-5 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	199
ตารางที่ ช-6 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	200
ตารางที่ ช-7 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	201
ตารางที่ ช-8 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	203
ตารางที่ ช-9 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	204
ตารางที่ ช-10 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	205
ตารางที่ ช-1 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิต่างๆ	208

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1-1 การเปรียบเทียบปริมาณการผลิตพลังงานขั้นต้นภายในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2544 และ 2554 [4]	2
รูปที่ 1-2 แผนผังการแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อน และเชิงชีวภาพ [6] [7]	3
รูปที่ 1-3 แสดงอุปกรณ์การทดลองเปลี่ยนแปลงลิกโนเซลลูโลสของเชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน	8
รูปที่ 1-4 แสดงอุปกรณ์การทดลองผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขยะมูลฝอยชุมชน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	11
รูปที่ 1-5 แสดงการใช้พลังงานและปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	12
รูปที่ 1-6 ระบบก๊าซซิฟิเคชันเพื่อให้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	15
รูปที่ 1-7 โครงสร้าง LIGNIN CELLULOSE และ HEMICELLULOSE ในองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสของเชื้อเพลิงชีวมวล [29]	19
รูปที่ 1-8 รูปร่างลักษณะของเมล็ด และเปลือกของมะม่วงหิมพานต์	21
รูปที่ 1-9 ลักษณะน้ำมัน CNSL ที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [42] [43]	24
รูปที่ 1-10 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวล [46]	26
รูปที่ 1-11 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (A) HYDROLYSIS; (B) DECOMPOSITION; (C) DEHYDRATION; (D) POLYMERIZATION; (E) DEAMINATION; (F) MAILLARD REACTION; (G) DECARBOXYLATION; (H) AMINOLYSIS; (I) CYCLIZATION; (J) HALOGENATIONS; (K) DEHYDROHALOGENATION; (L) CONDENSATION + PYROLYSIS.[47]	27
รูปที่ 1-12 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิกวิดแฟรกชัน [46]	28
รูปที่ 1-13 กลไกการเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันของเซลลูโลส [8]	29
รูปที่ 1-14 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำ ณ สภาวะอุณหภูมิ และความดันต่างๆ [42]	33
รูปที่ 1-15 การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ และค่าคงที่การแตกตัวของน้ำตามอุณหภูมิที่สมบูรณ์ 15 MPA	34
รูปที่ 1-16 แผนภาพ P-V ของน้ำ	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 1-17 แผนภาพ P-T สำหรับของไหลบริสุทธิ์ โดยแสดงเส้นความดันไอและเส้นปริมาตรคงที่ ในบริเวณของไหลสถานะเดียว	37
รูปที่ 1-18 รูปตัดของภาชนะความดันผนังบาง	46
รูปที่ 1-19 หน้าตัด (CROSS SECTION) ของภาชนะความดันผนังบาง	46
รูปที่ 1-20 ส่วนปิดของภาชนะความดันรูปทรงกระบอกที่ถูกกระทำด้วยความดัน	48
รูปที่ 1-21 แผนภาพ VAN KERVELLEN แสดงอัตราส่วนระหว่าง O:C กับ H:C สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง [7]	56
รูปที่ 1-22 กระบวนการแยกเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	58
รูปที่ 1-23 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการบดย่อย และการอบแห้ง	58
รูปที่ 1-24 น้ำกลั่นบริสุทธิ์ และเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่พร้อมสำหรับการทดลอง	59
รูปที่ 1-25 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (เชื้อเพลิงเหลว CNSC และ น้ำเสีย)	61
รูปที่ 1-26 แสดงแผนภาพกระบวนการวิจัยผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	63
รูปที่ 1-27 ระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย	64
รูปที่ 2-1 ถึงปฏิกรณ์ความดันสูงแบบ BOLTED CLOSURE REACTORS	66
รูปที่ 2-2 ตำแหน่งของท่อขนาด 0.0625 นิ้ว สำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ	67
รูปที่ 2-3 ระบบป้องกันความปลอดภัย SAFETY HEADS และ RUPTURE DISC	67
รูปที่ 2-4 เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	68
รูปที่ 2-5 ระบบควบคุมและตรวจวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกถังปฏิกรณ์ความดันสูง	70
รูปที่ 2-6 เกจวัดความดัน	71
รูปที่ 2-7 กิโลวัตต์-ฮาว์ มิเตอร์	71
รูปที่ 2-8 อุปกรณ์ภาชนะเครื่องแก้ว	72
รูปที่ 2-9 การกลั่นแบบธรรมดาหรือการกลั่นอย่างง่าย	73
รูปที่ 2-10 เครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวล	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2-11 ตู้อบแห้ง	74
รูปที่ 2-12 กระดาษกรอง	75
รูปที่ 2-13 ถังเก็บก๊าซตัวอย่าง	76
รูปที่ 2-14 น้ำกลั่นบริสุทธิ์	77
รูปที่ 2-15 ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต	78
รูปที่ 2-16 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะซิโตน	79
รูปที่ 2-17 ก๊าซไนโตรเจน	80
รูปที่ 2-18 เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ DIGICON DP-74SD และสายวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K	81
รูปที่ 2-19 เครื่องชั่งน้ำหนัก E-ACCURA รุ่น WB-600	82
รูปที่ 2-20 องค์ประกอบต่างๆ ของตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ [57]	83
รูปที่ 2-21 บอมบ์ หรือ HIGH PRESSURE OXYGEN COMBUSTION BOMB [58]	83
รูปที่ 2-22 ภาพตัดขวาง แสดงตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเสื้อฉนวน [58]	84
รูปที่ 2-23 ทอร์โมมิเตอร์ เสื้อฉนวน และตัวจุดระเบิด (IGNITION UNIT) ตามลำดับ ของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ PARR MODEL 1341 [59]	84
รูปที่ 2-24 เครื่อง MULTI-PARAMETER TESTER 35 SERIES สำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย	85
รูปที่ 2-25 เครื่อง PH METER, SENSIONTM1 HACH COMPANY U.S.A สำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเชื้อเพลิงเหลว	86
รูปที่ 2-26 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณของเหลว (THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER)	86
รูปที่ 2-27 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ (CHNS-O ANALYZER)	87
รูปที่ 2-28 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบ (GAS CHROMATOGRAPH-MASS SPECTROMETER)	88
รูปที่ 2-29 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (GAS CHROMATOGRAPH)	89
รูปที่ 2-30 เครื่องวิเคราะห์ไนโตรเจน	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2-31 เครื่องมือ SPECTROPHOTOMETER สำหรับตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง และวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส	91
รูปที่ 2-32 เครื่องวิเคราะห์ธาตุอื่นๆ หรืออะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (AAS)	93
รูปที่ 2-33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาของบอมบ์แบบอุณหภูมิคงที่	98
รูปที่ 3-1 ตำแหน่งในการตรวจวัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง และอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ ไฟฟ้า (ผนังด้านนอก ของถังปฏิกรณ์ความดันสูง)	102
รูปที่ 3-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับอุณหภูมิ 1. อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ ความดันสูง และ 2. อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ผนังด้านนอกของถังปฏิกรณ์ความดันสูง)	103
รูปที่ 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับอุณหภูมิ และความดันสัมบูรณ์ ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง	104
รูปที่ 3-4 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่น ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ และค่าคงที่การแตกตัว ของน้ำ ตามอุณหภูมิที่ 200 250 และ 300 °C	107
รูปที่ 3-5 ประสิทธิภาพระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	109
รูปที่ 3-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับปริมาณร้อยละ ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	111
รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับปริมาณร้อยละ ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมคาร์บอเนต)	112
รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูง ของเชื้อเพลิงเหลว (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	113
รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูง ของเชื้อเพลิงเหลว (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมคาร์บอเนต)	114
รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพ การเปลี่ยนรูปพลังงาน (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	115
รูปที่ 3-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพ การเปลี่ยนรูปพลังงาน (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมคาร์บอเนต)	116

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	117
รูปที่ 3-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	117
รูปที่ 3-12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	121
รูปที่ 3-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	123
รูปที่ 3-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	123
รูปที่ 3-15 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ	126
รูปที่ 3-16 วัตถุดิบตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง	128
รูปที่ 3-17 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	129
รูปที่ 3-18 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	129
รูปที่ 3-19 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	130
รูปที่ 3-20 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	130
รูปที่ 3-21 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	131
รูปที่ 3-22 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	131
รูปที่ 3-23 พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น และพลังงานที่ได้ตอนสุดท้ายจากกระบวนการทดลอง	132

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-24 ค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่งปฏิกิริยาความดันสูง	133
รูปที่ 3-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อน ในรูปแบบการนำความร้อนรวม	137
รูปที่ 3-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อน ในรูปแบบการพาความร้อนรวม	138
รูปที่ 3-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อน ในรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนรวม	139
รูปที่ 3-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อน ในรูปแบบการสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	140
รูปที่ 3-31 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	141
รูปที่ 3-32 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	141
รูปที่ 3-33 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)	142
รูปที่ 3-34 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	142
รูปที่ 3-35 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	143
รูปที่ 3-36 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)	143
รูปที่ ก-1 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะของน้ำ	170
รูปที่ ก-1 แสดงรายละเอียดสมดุลพลังงานในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	176
รูปที่ ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C	185

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ฉ-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 250 °C	187
รูปที่ ฉ-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C	189
รูปที่ ฉ-5 สมการเส้นแนวโน้มของการสูญเสียความร้อน ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสีย ความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C	190

รายการสัญลักษณ์

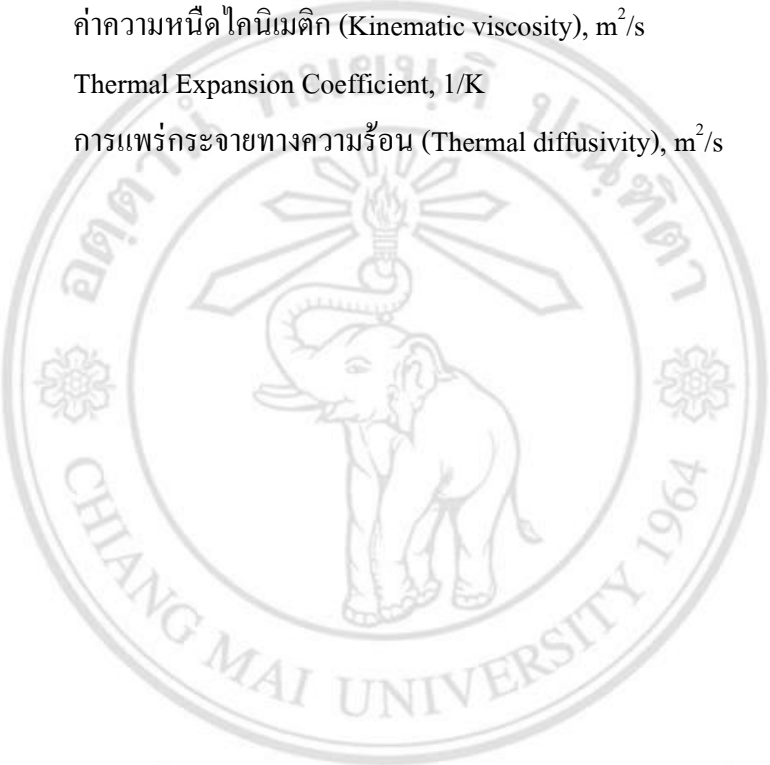
A	พื้นที่ผิวของวัสดุ, m^2
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะของสแตนเลส, $J/kg\ K$
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของภาชนะความดัน, m
E	พลังงานที่ใช้เพื่อเพิ่มและรักษาอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์, MJ
$E_{Liquid\ fuel}$	พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหลว, MJ
E_{CNS}	พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น, MJ
g	Gravitational acceleration, m/s^2
h	ค่าเอนทาลปี, kJ/kg
h_{conv}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2\ K$
h_{cyl}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ของทรงกระบอกที่ถูกลงตั้งอยู่ในแนวดิ่ง, $W/m^2\ K$
k	สภาพการนำความร้อน, $W/m\ ^\circ C$
K_w	ค่าคงที่การแตกตัว
L	ความยาวของวัสดุ, m
m	มวลของวัตถุ, kg
P	ความดัน, kPa
Pr	Prandtl's Number
Q	พลังงานความร้อน, kJ
Q_{Total}	การสูญเสียความร้อนรวมทั้งระบบ, W
$Q_{Conduction}$	การสูญเสียความร้อนแบบการนำความร้อน, W
$Q_{Convection}$	การสูญเสียความร้อนแบบการพาความร้อน, W
$Q_{Radiation}$	การสูญเสียความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน, W
$Q_{Absorption}$	การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า
$Q_{Unaccountable\ loss}$	พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้ (Unaccountable Loss)
Ra_L	Rayleigh number
r_i	รัศมีภายในของภาชนะความดัน, m
T_{in}	อุณหภูมิสัมบูรณ์ ณ สภาวะเริ่มต้น, K

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{fi}	อุณหภูมิสัมบูรณ์ ณ สภาวะสุดท้าย, K
$T_{Black\ body}$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุดำ, K
$T_{Surface}$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ผิวน้ำ, K
$T_{Surround}$	อุณหภูมิสัมบูรณ์อากาศ, K
T_{∞}	อุณหภูมิสัมบูรณ์อากาศที่ไหลผ่าน, K
t	ความหนาของภาชนะความดัน, m
U^t	พลังงานภายในรวมของระบบ, kJ/kg
u	พลังงานภายใน, kJ/kg
u_{in}	พลังงานภายใน ณ สภาวะเริ่มต้น, kJ/kg
u_{fi}	พลังงานภายใน ณ สภาวะสุดท้าย, kJ/kg
$u_{@X}$	พลังงานภายในที่มีค่าคุณภาพไอน้ำในสภาวะนั้นเท่ากับ x, kJ/kg
V_{in}	ปริมาตรเริ่มต้น, m ³
V_{fi}	ปริมาตรสุดท้าย, m ³
v	ปริมาตรจำเพาะ, m ³ /kg
v_f	ปริมาตรจำเพาะของเหลว, m ³
v_g	ปริมาตรจำเพาะของก๊าซ, m ³
W	งาน, W
W_{oil}	ปริมาณเชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ, g
$W_{residue}$	ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ, g
W_{feed}	ปริมาณน้ำและวัตถุดิบตั้งต้น, g
x	คุณภาพไอน้ำ
σ	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
σ_{tc}	ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ในผนังของภาชนะความดันผนังบาง
σ_{tL}	ความเค้นตามแนวแกนนอนในผนังของภาชนะความดัน
dV	การเปลี่ยนแปลงปริมาตร
ϵ_{RDC}	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant)

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

ε	ค่าความสามารถในการปลดปล่อย (Emissivity) สำหรับวัตถุใดๆ ที่ไม่ใช่วัตถุดำ
ζ	ตัวแปรไร้มิติ
ν	ค่าความหนืดไคเนติก (Kinematic viscosity), m^2/s
β	Thermal Expansion Coefficient, $1/\text{K}$
α	การแพร่กระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity), m^2/s



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 1

บทนำ

ในการศึกษาวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติในด้านการนำเชื้อเพลิงชีวมวล อาทิเช่น เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ แกลบ ชังข้าวโพด และเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ฯลฯ ที่มีอยู่ไปใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานทดแทนให้แก่ประเทศชาติต่อไปในอนาคต ทั้งนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎี และหลักการ ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

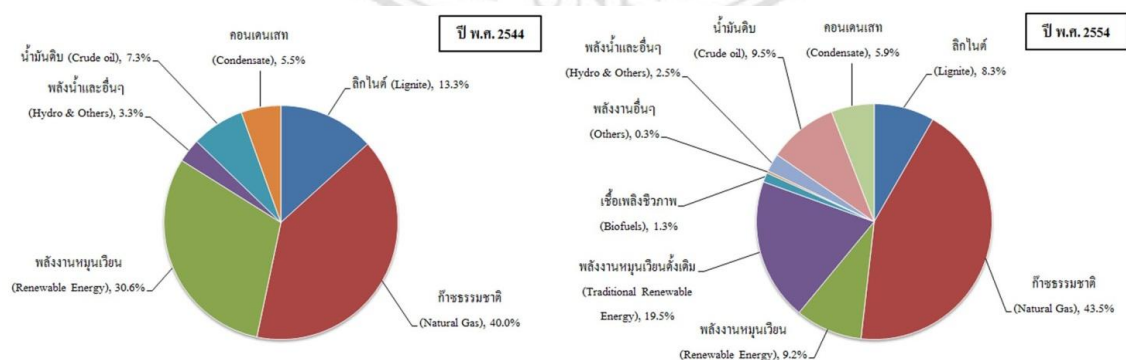
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวัน การปรับปรุงคุณภาพชีวิต และการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศกำลังพัฒนา มีความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากทรัพยากรพลังงาน เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ภายในประเทศมีค่อนข้างจำกัด จึงต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เช่น การใช้ก๊าซธรรมชาติจากประเทศพม่า การนำเข้าถ่านหินจากประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลีย ฯลฯ โดยกว่าครึ่งหนึ่งของความต้องการพลังงาน และสัดส่วนการพึ่งพาพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงในการจัดหาพลังงาน หรือการสำรองพลังงานเพื่อใช้ในอนาคต และยังไปกว่านั้นในปัจจุบันต้นทุนการผลิตพลังงานและต้นทุนการใช้พลังงานก็มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2]

ในช่วงสภาวะวิกฤตพลังงานของโลกในปี พ.ศ. 2550 ที่ราคาน้ำมันในตลาดโลกผันผวนมาก และมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกพุ่งสูงขึ้นเป็นประวัติการณ์ ในช่วงเมษายน-สิงหาคม 2550 ราคาน้ำมันดิบดูไบอยู่ในระดับ 64-69 ดอลลาร์สหรัฐต่อบาร์เรล และเพิ่มสูงขึ้นกว่า 86 ดอลลาร์สหรัฐต่อบาร์เรล ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2550 ซึ่งมีผลให้ประเทศไทยลดการนำเข้าลง โดยปริมาณการนำเข้าลดลงร้อยละ 2.5 และมูลค่าลดลงร้อยละ 6.8 [3] ซึ่งจากเหตุการณ์ดังกล่าวมีผลกระทบโดยตรงต่อประเทศไทยทั้งในด้านเศรษฐกิจ การคมนาคมขนส่ง และสภาพความเป็นอยู่ประชาชนที่

ต้องใช้พลังงานที่มีมูลค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ในช่วงสภาวะดังกล่าวทางรัฐบาลได้พยายามแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น การใช้น้ำมันไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซล การใช้พลังงานชีวมวล (อาทิเช่น ไม้ฟืน แกลบ และ ชังข้าวโพด ฯลฯ) ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ในอุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อน การรณรงค์เรื่องการอนุรักษ์พลังงานในอาคารและโรงงาน การส่งเสริมการใช้งานเทคโนโลยีพลังงานทดแทน ฯลฯ

แต่ถึงกระนั้นก็ตามจากรายงานพลังงานของประเทศไทยปี 2554 พบว่า ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 13 และเพิ่มขึ้นจากปี 2553 ร้อยละ 0.4 โดยใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ อันประกอบไปด้วยน้ำมันสำเร็จรูป ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และไฟฟ้า เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.2 และใช้พลังงานหมุนเวียน อันประกอบไปด้วย แสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ และก๊าซชีวภาพ เพิ่มขึ้นร้อยละ 21.1 พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมประกอบไปด้วย ฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ลดลงร้อยละ 6.3 จากข้อมูลในส่วนของการผลิตพลังงานขึ้นต้นภายในประเทศระหว่างปี 2544 และ 2554 (แสดงดังรูปที่ 1-1) พบว่ามีการผลิตพลังงานขึ้นต้นที่สำคัญอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 43.5 ลิกไนต์ลดลงเหลือร้อยละ 8.3 พลังงานหมุนเวียน (แสงอาทิตย์ ฟืน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ขยะ และก๊าซชีวภาพ) ลดลงเหลือร้อยละ 9.2 น้ำมันดิบเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 9.5 เชื้อเพลิงชีวภาพ (เอทานอล และไบโอดีเซล) เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.3 และพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม (ฟืน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร) เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.5 และจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ และพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมเพิ่มขึ้น จึงเป็นแนวโน้มที่ดีต่อการผลิตพลังงานทดแทนจากพลังงานหมุนเวียนที่เรียกว่า “ชีวมวล (Biomass)” เพื่อสนับสนุนความต้องการพลังงาน ลดปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันดิบของประเทศต่อไปในอนาคต

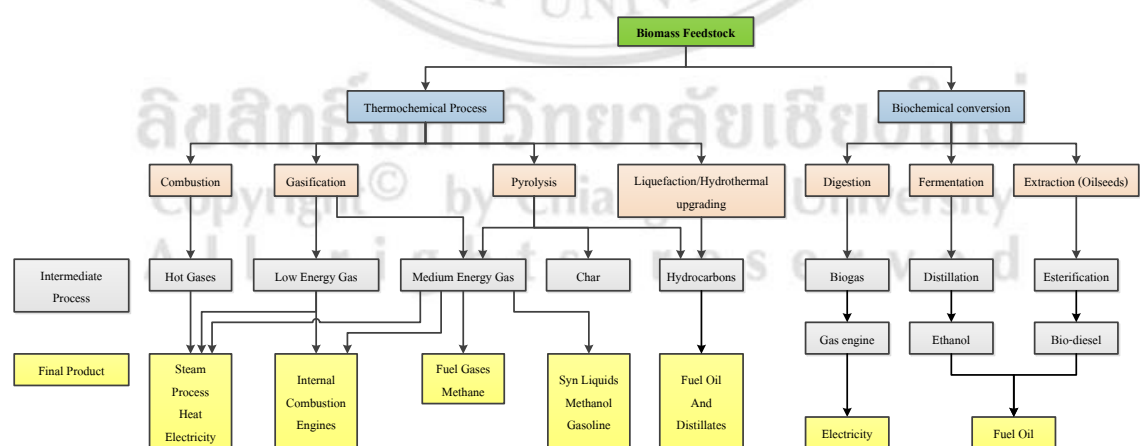


รูปที่ 1-1 การเปรียบเทียบปริมาณการผลิตพลังงานขึ้นต้นภายในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2544 และ 2554 [4]

ชีวมวล [1] [5] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยสารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น พืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุ

เหลือทิ้งการเกษตร ไม้ และเศษไม้ หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน ซึ่งชีวมวลจะประกอบไปด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย

แนวทางการแปลงสภาพชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานสามารถแยกออกเป็น 2 กระบวนการ คือ 1. การแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Conversion) ได้แก่ การเผาไหม้ก๊าซซิฟิเคชัน ไพโรไลซิส และไฮโดรเทอร์มอล 2. การแปลงสภาพเชิงชีวภาพ (Bio-Chemical Conversion) ได้แก่ การย่อย การหมัก และการหีบแยก ทั้งนี้กระบวนการแปลงสภาพชีวมวลแต่ละกระบวนการมีเงื่อนไขและสถานะในการทำงานที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ประเภทของชีวมวล อุณหภูมิ ความดัน ตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่ได้ ฯลฯ (ดังแสดงในรูปที่ 1-2) ดังนั้นการเลือกใช้แนวทางการแปลงสภาพชีวมวลให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของชีวมวลและวัตถุประสงค์การใช้งานจึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น การนำเศษไม้ไปใช้ในกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน การนำของเสียจากมูลสัตว์ไปหมักเป็นก๊าซชีวภาพ การนำน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองไปผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ฯลฯ สำหรับชีวมวลที่มีน้ำมัน สารระเหย และความชื้นสูง เช่น ผักตบชวา เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ไม้สน และสาหร่าย ฯลฯ ในปัจจุบันได้มีการทดลองนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นใน “กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process)” เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) หรือ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และถ่านชีวภาพ (Bio-Char) ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนากระบวนการ และเทคโนโลยีผลิตพลังงานเพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์ต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1-2 แผนผังการแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อน และเชิงชีวภาพ [6] [7]

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [8] [9] คือ กระบวนการทางเคมีและความร้อนที่ใช้ น้ำ ณ สถานะได้จุวิกฤต (Subcritical Water) อุณหภูมิ 200-300 °C ความดัน 1.5-8 MPa และตัวเร่งปฏิกิริยา [10] เป็นส่วนช่วย

ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของชีวมวลให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว ที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้น [11] [12] ทั้งนี้รูปแบบของกระบวนการดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับการกระบวนการเกิดน้ำมันปิโตรเลียม และถ่านหินตามธรรมชาติ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชหลากหลายชนิด อาทิเช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย กากถั่วเหลือง ฯลฯ ซึ่งในแต่ละปีก็จะมีปริมาณของเสียเหลือทิ้งจากการเกษตรเป็นอย่างมาก จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตพลังงานด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น เผาไหม้โดยตรง การหมักก๊าซชีวภาพ ฯลฯ และจากข้อมูลการสืบค้นเอกสารต่างๆ เบื้องต้นพบว่าในประเทศไทยได้มีการนำชีวมวล คือ ไม้ไผ่ [13] และซังข้าวโพด [14] มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน เพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับถ่านหิน สำหรับชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่มีการเพาะปลูกอยู่ภายในประเทศไทย และมีของเสียที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายคือ “เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Shell: CNS)” ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ส่วน คือ น้ำมัน (Cashew Nut Shell Liquid: CNSL) และเปลือกแข็ง โดยส่วนใหญ่จะนำเปลือกที่ผ่านกระบวนการแกะเมล็ดภายในออกแล้ว จะนำไปหีบน้ำมันเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม ส่วนเปลือกที่เหลือก็จะนำไปทิ้งเป็นของเสีย หรือใช้เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ต่อไป ซึ่งการเผาไหม้จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ [15] จากข้อมูลจำนวนครัวเรือนเกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนการเพาะปลูกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับกรมส่งเสริมการเกษตร ปี 2554 มีจำนวนทั้งหมด 17,285 ครัวเรือน [16] และข้อมูลปี 2547 มีพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศ 210,942 ไร่ มีเนื้อที่ให้ผลแล้ว 165,278 ไร่ ผลผลิต (เปลือก + เมล็ด) 42,126 ตันต่อปี และผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 257 kg/ไร่ [17] คิดเป็นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือ 25,275 ตันต่อปี (ร้อยละ 60 ของผลผลิต)

ดังนั้นแนวทางการศึกษาวิจัย เกี่ยวกับการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความดัน ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ และคุณสมบัติเบื้องต้น (ค่าความร้อนสูง และความชื้น) ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการฯ จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนแนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในการผลิตพลังงานทดแทนต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

1.2.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนสูงและคุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

Mehmet K. Akalin (2012) [9] : ดำเนินการศึกษาเรื่องการผลิตน้ำมันชีวภาพจากผลเชอร์รี่ (Cornelian Cherry Stones) โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิกวิดเฟรกชัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C ช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 15 และ 30 นาที จากผลการทดลองทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 และ 300 °C ช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพ มากที่สุด ประมาณร้อยละ 28 wt.%, ca. ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะมีปริมาณลดลงเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความร้อนสูงของน้ำมันชีวภาพ Light Bio-oil (LBO) และ Heavy Bio-oil (HBO) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นเทียบกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูงประมาณ 23.86 และ 28.35 MJ/kg ตามลำดับ สำหรับองค์ประกอบหลักของ LBOs ได้แก่ ฟีนอล (Phenols) กรดอะซิติก (Acetic acid) เฟอฟูรัล (Furfurals) วานิลลิน (Vanillin) ส่วน HBOs ได้แก่ เฟอฟูรัล ฟีนอล กรดไขมัน (Fatty acid)

Shuangning Xiu (2010) [18] : ดำเนินศึกษาปัจจัย (อุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และ ความดันของก๊าซใน ไตรเจนเริ่มต้น) ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตและคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตจากมูลสุกร ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไพโรไลซิส (Hydrothermal Pyrolysis) โดยมีเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 260-340 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0-90 นาที ความดันของก๊าซใน ไตรเจนเริ่มต้น 0-150 psi ซึ่งจากผลการศึกษพบว่าที่อุณหภูมิ 260-340 °C จะมีปริมาณน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.9 ถึง 24.2 แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้มีปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการน้อยลง สำหรับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อผลผลิตที่ได้ กล่าวคือ เมื่อใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 15 นาทีจะมีปริมาณน้ำมันชีวภาพโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 21 และมีปริมาณลดลงเหลือร้อยละ 12.5 เมื่อ

เพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 90 นาที ในส่วนของความดันของก๊าซไนโตรเจนเริ่มต้นที่ 0-100 psi จะมีปริมาณน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11.9-24.2 และเมื่อเพิ่มความดันของก๊าซไนโตรเจนเริ่มต้นเป็น 150 psi จะมีปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลงเหลือร้อยละ 18.8 ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 340 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 15 นาที และความดันของก๊าซไนโตรเจนเริ่มต้น 100 psi จะได้ผลผลิตของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดร้อยละ 24.2 มีองค์ประกอบของคาร์บอน (C) ร้อยละ 73 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 10 ออกซิเจน (O) ร้อยละ 13 ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 4 และมีค่าความร้อนสูง 36.05 MJ/kg ซึ่งเป็นค่าความร้อนสูงที่สุดที่ได้จากการทดลอง

Kubilay Tekin (2012) [19] : ดำเนินศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ลิควิดแฟกชัน ของไม้บีช (Beech wood) โดยใช้แร่แคลเซียมบอเรต Calcium Borate ($\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2$) จากธรรมชาติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250 300 และ 350 °C ทั้งแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าผลผลิตที่เป็นน้ำมันชีวภาพ LBO และ HBO มีค่าสูงสุตร้อยละ 11.1 wt.% และ 29.8 wt.% ณ ที่อุณหภูมิ 300 °C แบบใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนผลผลิตน้ำมันชีวภาพรวมที่อุณหภูมิ 300 °C แบบไม่ใส่ กับใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่า 22 wt.% และ 41 wt.% ca. ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนสูงที่สุดของน้ำมันชีวภาพ LBO มีค่า 23.81 MJ/kg และ HBO มีค่า 27.53 MJ/kg ณ การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 °C

Dong Zhou (2010) [20] : ดำเนินการศึกษการผลิตน้ำมันจากสาหร่าย เอนเทอโมร์ฟา โปรลิเฟรา (Enteromorpha Prolifera) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟกชัน ที่อุณหภูมิ 220-320 °C โดยศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตน้ำมันชีวภาพ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °C ความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนต 5 wt.% และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที สามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้สูงสุดประมาณ 23 wt.% มีค่าความร้อนสูง 28-30 MJ/kg มีองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ คือ คีโตน (Ketones) แอลดีไฮด์ (Aldehydes) ฟีนอล (Phenols) แอลคีน (Alkenes) กรดไขมัน (Fatty acids) เอสเทอร์ (Esters) อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatics) และ สารประกอบเฮเทอโรไซคลิกที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (Nitrogen Containing Heterocyclic Compounds) ส่วนกรดอะซิติก (Acetic acid) จะอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารละลายน้ำ

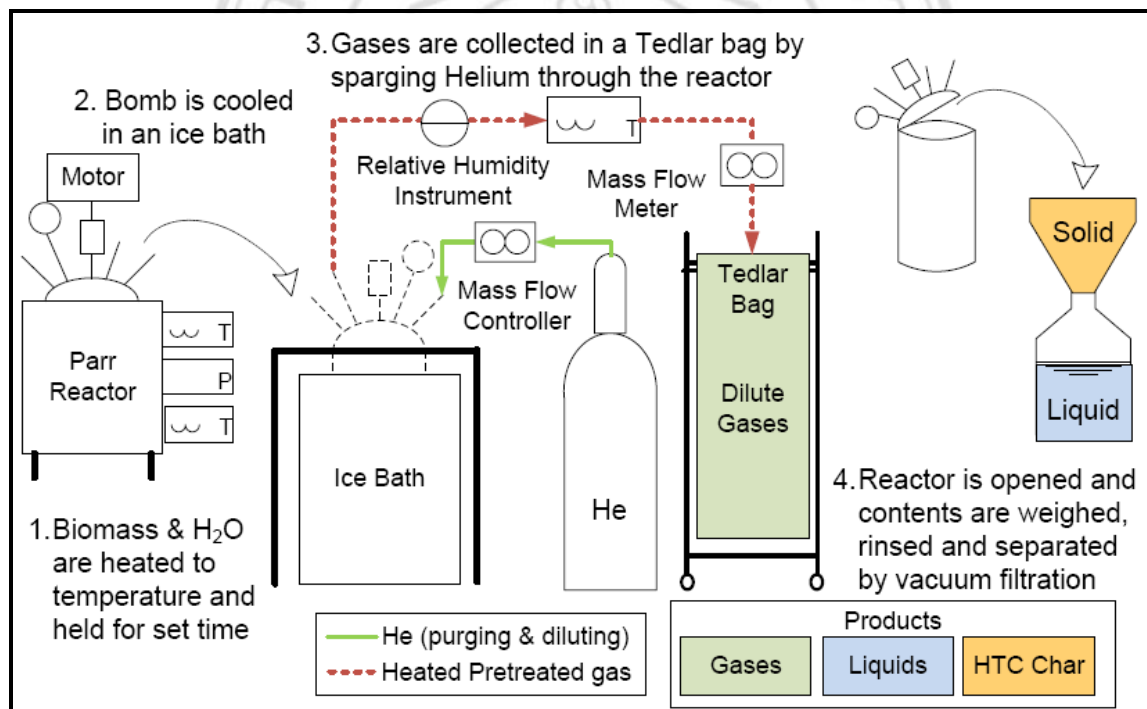
Yixin Qu (2002) [12] : ดำเนินการศึกษาการทดลองทำปฏิกิริยาลิกวิดแฟรกชัน (Liquefaction) โดยตรงกับไม้สน *Cunninghamia Lanceolata* ใน น้ำร้อน ที่อุณหภูมิระหว่าง 280-360 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10-30 นาที และปริมาณไม้สนที่ใช้ในการทดลอง 8 กรัม 10 กรัม และ 12.5 กรัม ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 320 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที ปริมาณไม้สน 8 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร จะได้ผลผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพร้อยละ 24 และในช่วงการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 320 และ 340 °C พบว่าปริมาณน้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่อนข้างสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนปริมาณไม้สนด้วย สำหรับการทดสอบค่าความร้อนสูง พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 340 องศา ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที ปริมาณไม้สน 8 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร จะมีค่าความร้อนสูง 30.221 MJ/kg

1.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็งโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

Daniel Schneider (2011) [21]: ดำเนินการศึกษาคุณลักษณะของไบโอชาร์ (Biochar) จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนีเซชันของไม้ไผ่ ในการทดลองได้นำไม้ไผ่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 2.2 MPa ในถังปฏิกรณ์แบบปิดในเวลาทั้งหมด 6 ชั่วโมง จากนั้นนำผลผลิตที่ได้เป็นของแข็ง และของเหลวมาวิเคราะห์ผลซึ่งพบว่าของแข็งที่ได้มีลักษณะเหมือนถ่าน มีผิวขรุขระ และมีรูพรุน มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16.8 MJ/kg เป็น 28.7 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนท์ คิดเป็นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานร้อยละ 76.9 ส่วนผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเหลวพบว่า ของเหลวที่ผ่านกระบวนการฯ มีฤทธิ์เป็นกรด มีค่า pH 3.4 และประกอบไปด้วยสารไนโตรเจน (100 mg/L) ฟอสฟอรัส (52 mg/L) โพแทสเซียม (1642 mg/L) ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าวเป็นที่น่าสนใจว่าของแข็งที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนีเซชัน นั้นสามารถนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ไบโอชาเพื่อสนับสนุนการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ รวมไปถึงการใช้เป็นสารดักจับคาร์บอน ส่วนของเหลวนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยได้

S. Kent Hoekman (2011) [22]: ดำเนินการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลิกโนเซลลูโลสของเชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้สน (Jeffrey pine and White fir) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนีเซชัน เพื่อทดสอบเงื่อนไขในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์และ %Yield ณ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาระหว่าง 215-295 °C (ความดันประมาณ 4-5 MPa) ในระยะเวลา 5-60 นาที จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการทำปฏิกิริยา จะมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ และของเหลวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่จำนวนถ่านที่ได้จะมีจำนวนลดลง

แต่กลับทำให้ถ่านมีพลังงานสะสมเพิ่มมากขึ้น ส่วนการทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที เสร็จสิ้นอุณหภูมิ 255 °C และ 295 °C จะได้ปริมาณถ่านที่มีค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นร้อยละ 39 (28.3 MJ/kg) และร้อยละ 45 (29.5 MJ/kg) ของพลังงานสะสมในชีวมวลเริ่มต้น (20.3 MJ/kg) ตามลำดับ ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิ และเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านที่มีอัตราส่วนของ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (Atomic O/C Ratio) ลดลงจากเชื้อเพลิงชีวมวลตั้งต้น 0.63 ลดลงเหลือประมาณ 0.2-0.3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับถ่านหิน และในส่วนของเหลวที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ (215-235 °C) จะมีระดับของปริมาณน้ำตาลสูงกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง แต่การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง 255-295 °C จะสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดอะซิดิกจะเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่ำและสูง มีประโยชน์ที่ช่วยการฟื้นคืนกลับของน้ำตาลในชีวมวล และสามารถผลิตถ่านที่มีค่าพลังงานความร้อนสูงได้ตามลำดับ



รูปที่ 1-3 แสดงอุปกรณ์การทดลองเปลี่ยนแปลงลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล
ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์

Nakorn Worasuwannarak (2006) [14] : ดำเนินการศึกษาระบวนการคาร์บอนไนซ์ของชีวมวล (ซังข้าวโพด) ในน้ำร้อนความดันสูง เตรียมโดยใช้ Small Bomb Reactor และทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300-350 °C และความดัน 10-18 MPa เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บส่วนที่เป็นของแข็ง หรือถ่านซังข้าวโพด เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์อัตราส่วนของ

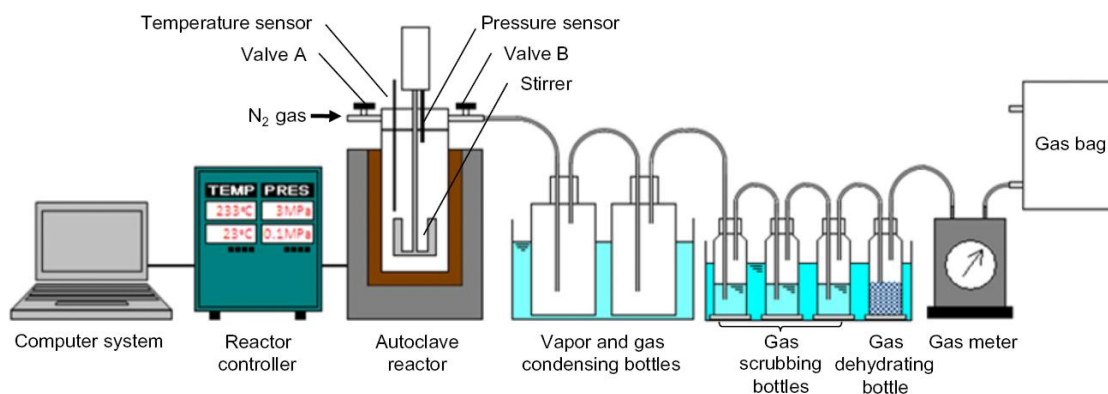
กระบวนการคาร์บอนไนเซชันในน้ำร้อนความดันสูงที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีของถ่านซังข้าวโพด จากการทดลองพบว่า ผลผลิตของถ่านซังข้าวโพดที่เตรียมจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในน้ำร้อนความดันสูงที่อุณหภูมิ 350 °C และความดัน 10 MPa เป็นเวลา 30 นาที มีค่า %Yield 44.7% และมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 4,722.9 cal/g เป็น 7,580.4 cal/g ในขณะที่ผลผลิตของถ่านซังข้าวโพดที่เตรียมจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในบรรยากาศของไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีค่า %Yield 36.4% และมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 4,722.9 cal/g เป็น 7,048.5 cal/g และจากผลการทดสอบพบว่าผลผลิตของถ่านซังข้าวโพดที่เตรียมจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในน้ำร้อนความดันสูงที่อุณหภูมิ 350 °C และความดัน 18 MPa มีค่าความร้อนสูงที่สุดประมาณ 8,334.8 cal/kg และจากข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุของถ่านซังข้าวโพด พบว่าหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนของซังข้าวโพดจะสลายตัวระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในน้ำร้อนความดันสูง นอกจากนั้น กระบวนการคาร์บอนไนเซชันในน้ำร้อนความดันสูงมีผลต่อพฤติกรรมทางไพโรไลซิสและการเผาไหม้ของถ่านซังข้าวโพดเป็นอย่างมากด้วย

Moriyasu Nonaka (2011) [23] : ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพของถ่านหินคุณภาพต่ำ และเศษชีวมวล โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ในรูปแบบเตาปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และแบบครั้งต่อครั้ง พร้อมทั้งนำถ่านหินคุณภาพต่ำและเศษชีวมวลผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 0.3 0.5 0.7 และ 1 จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาที่ความดัน 12 MPa อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาทำ 30 นาที ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนการผสมชีวมวลจะมีผลต่อค่าความร้อน โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของชีวมวลจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจากค่าความร้อนของถ่านหินคุณภาพต่ำ 20,264 kJ/kg และเศษชีวมวล 20,470 kJ/kg เพิ่มขึ้นเป็น 26,350-30,240 kJ/kg สำหรับค่าความร้อนสูงที่สุดจะมีอัตราส่วนของชีวมวลที่ร้อยละ 100 ซึ่งค่าความร้อนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหินซับบิทูมินัส

Pandji Prawisudha (2012) [11] : ดำเนินการศึกษาแนวทางการผลิตเชื้อเพลิงถ่านหิน จากขยะมูลฝอยชุมชนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล มีหลักการและแนวทางการศึกษา คือ การนำขยะมูลฝอยชุมชน เช่น พลาสติก ขยะความชื้นสูง ฯลฯ มาย่อยสลายด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิประมาณ 215-235 °C และความดันประมาณ 2.0-2.6 MPa จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านกระบวนการระเหยน้ำ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีการใช้พลังงาน (พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า) ประมาณ 0.25 ของค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ และ ณ สถานะการทดสอบที่ความดัน ประมาณ 2.0-2.6 MPa

อุณหภูมิไอน้ำ 215-235 °C ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยา 30-90 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงแข็ง ที่มีค่าความร้อน สูงที่สุดประมาณ 24.2 MJ/kg (Dry basic) หรือมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 20 MJ/kg (Dry basic) และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ผ่านกระบวนการระเหยน้ำ จะทำให้เชื้อเพลิงแข็งมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 23.1 MJ/kg เป็น 27.3 MJ/kg และช่วยลดความชื้น และลดปริมาณคลอรีน จาก 62.6 wt.% เหลือ 48.7 wt.% และจาก 2.13 wt.% เหลือ 1.41 wt.% ตามลำดับ ซึ่งกล่าวโดยสรุปแล้วกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิสูง และช่วงเวลาการทำปฏิกิริยานาน จะสามารถลดปริมาณสารคลอรีน และเพิ่มค่าความร้อนของขยะมูลฝอยชุมชน ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหินประเภท Low-grade sub-bituminous coal ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ได้

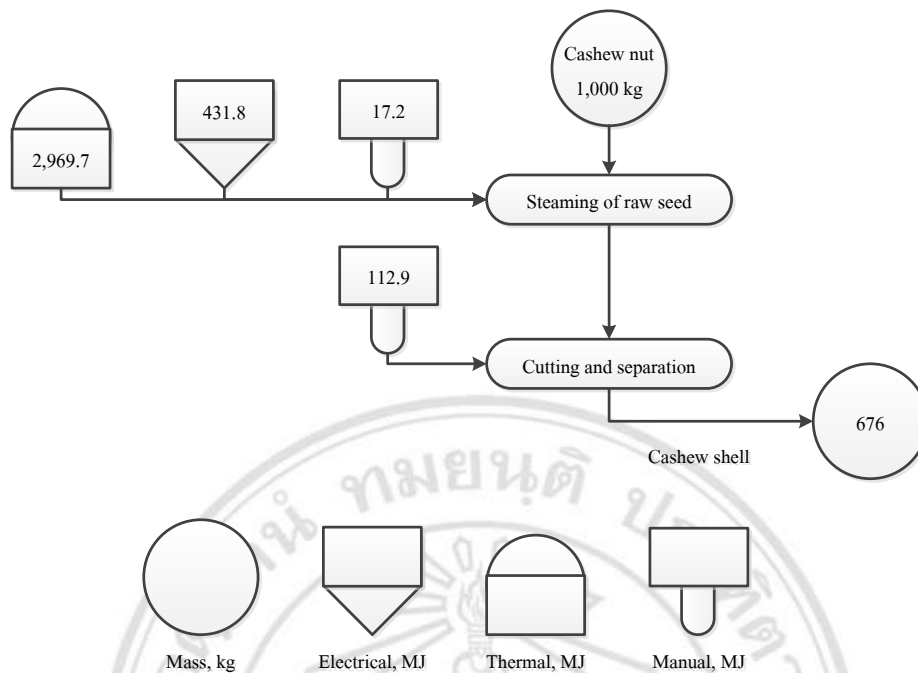
In-Hee Hwang (2012) [8] : ดำเนินการศึกษการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขยะมูลฝอยชุมชน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่สภาวะ Subcritical water ที่อุณหภูมิ 234 °C ความดัน 3 MPa (LT condition) และอุณหภูมิ 295 °C ความดัน 8 MPa (HT condition) สำหรับขยะมูลฝอยที่ใช้คือ กระดาษ อาหารสุนัข เศษไม้ตะเกียบ และพลาสติก ทั้งนี้สำหรับ กระดาษ อาหารสุนัข และเศษไม้ตะเกียบได้ผสมผงฟิวรี และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ลงไป เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสารคลอรีน (Chlorine-Cl) ในผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และจากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณคาร์บอนกว่า 75% ในขยะมูลฝอยที่เป็น กระดาษ อาหารสุนัข และเศษไม้ตะเกียบ ถูกเปลี่ยนให้เป็นถ่าน มีค่าความร้อนประมาณ 13,886-27,544 kJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Brown coal และ Lignite ทั้งนี้ในส่วนของพลาสติก พบว่าปริมาณคาร์บอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปเป็นถ่านภายใต้การทดสอบทั้งสองเงื่อนไข และผลการทดสอบคลอรีนในผลิตภัณฑ์พบว่า คลอรีนที่ผสมเข้าไปจะพบอยู่ในถ่านประมาณ 85-99% ที่เหลือจะผสมอยู่ในของเหลว และก๊าซประมาณ 1-15% ซึ่งเมื่อนำถ่านที่มีส่วนผสมของคลอรีนไปผ่านกระบวนการล้างน้ำ จะทำให้คลอรีนที่สามารถละลายได้ถูกขจัดออกไปจากถ่าน ส่งผลทำให้ถ่านมีปริมาณคลอรีนน้อยลง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ต่อไป



รูปที่ 1-4 แสดงอุปกรณ์การทดลองผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขยะมูลฝอยชุมชน
ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

1.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ

Atul Mohod (2011) [24] : ดำเนินการศึกษาการใช้พลังงานในกรรมวิธีการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ การวิเคราะห์โดยประมาณ การวิเคราะห์ค่าความร้อน และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ในอุตสาหกรรมการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดเล็ก มีการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต โดยเฉลี่ยประมาณ 2,969.7 MJ ต่อ 1,000 kg ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์วัตถุดิบ และจะมีเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นของเสียอยู่ประมาณร้อยละ 67.5 ของน้ำหนักเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งหมด และจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์พบว่า มีความร้อนโดยเฉลี่ยประมาณ 4,890 kcal/kg ความชื้น ร้อยละ 6.47 สารระเหย ร้อยละ 72 จี๊ไธ ร้อยละ 1.05 และปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 20.48 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนพบว่าน้ำหนักของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะลดลงประมาณร้อยละ 85 ที่อุณหภูมิ 500 °C ภายในระยะเวลา 13 นาที ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ต่างๆ ข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิง ในกระบวนการให้ความร้อนแก่กระบวนการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตลอดจนกระบวนการไพโรไลซิสในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้



รูปที่ 1-5 แสดงการใช้พลังงานและปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

Sanger H. A. (2012) [25] : ดำเนินการศึกษาด้านแบบของเตาผลิตถ่าน สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยกรรมวิธีการเผาไหม้ 2 แบบคือ 1. การให้ความร้อนกับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตรง และ 2. การให้ความร้อนกับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยทางอ้อม พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์การวิเคราะห์โดยประมาณ เช่น ความชื้น ปริมาณสารที่ระเหยได้ ปริมาณปริมาณเถ้า ค่าความร้อน และคาร์บอนคงตัว ฯลฯ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของถ่านที่ได้จากกระบวนการเผาทั้ง 2 แบบ เทียบกับ ผลการวิเคราะห์เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ยังไม่ผ่านการเผาไหม้ ดังผลการทดลองในตารางต่อไปนี้

สงวนลิขสิทธิ์โดย
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 1-1 แสดงการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

วัตถุดิบ	กระบวนการเผา	อุณหภูมิการเผาไหม้ (°C)	การวิเคราะห์โดยประมาณ						
			ความชื้น (%)	ปริมาณสารที่ระเหยได้ (%)	ค่าความร้อน (kcal/kg)	ปริมาณถ่าน (%)	ปริมาณเถ้า (%)	Bulk density (kg/m ³)	Oil content (%)
CNS	-	-	10-11	65-70	5,000	-	-	481.83	20-25
CNS char	การเผาโดยตรง	452.2	5-6	25-30	6,474.6	21.04	3.34	N/A	21.1
CNS char	การเผาโดยทางอ้อม	458.8			6,714.8	18.3	1.27	N/A	23.8

ตารางที่ 1-2 แสดงการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

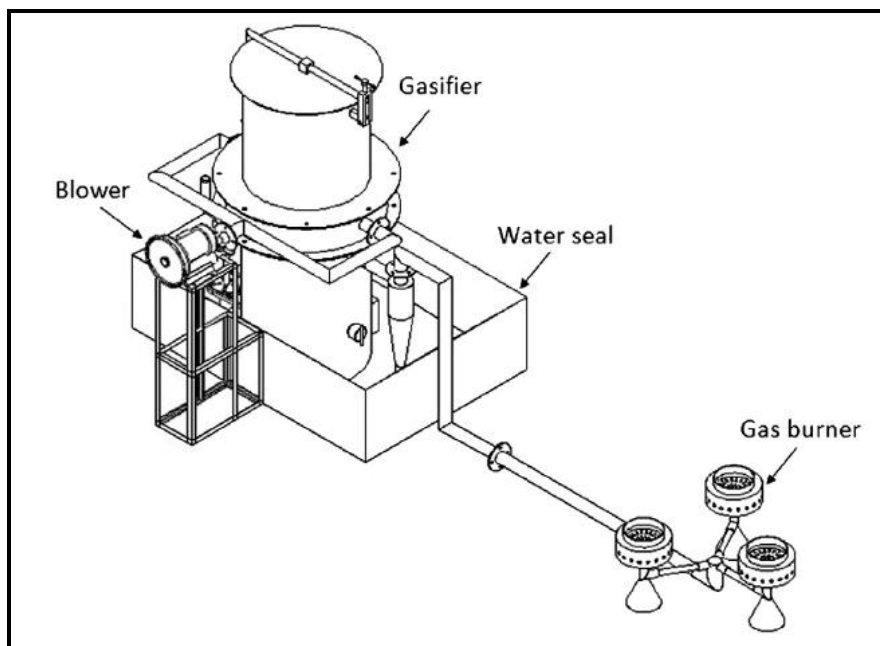
วัตถุดิบ	กระบวนการเผา	อุณหภูมิการเผาไหม้ (°C)	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%)			
			C	H	N	O
CNS	-	-	60-62	6-7	0.70-0.75	29-31
CNS char	การเผาโดยตรง	452.2	73-76	4-5	1-2	13-14
CNS char	การเผาโดยทางอ้อม	458.8				

ซึ่งผลจากการศึกษาจะสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการเผาถ่านที่มีความเหมาะสม สะดวกต่อการใช้งาน และมีประสิทธิภาพ นั่นก็คือการเผาโดยทางอ้อม ซึ่งจะสามารถผลิตถ่านที่มีค่าความร้อนสูง และมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ในถ่านที่ผลิตจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สูงที่สุด ประมาณร้อยละ 60

Piyali Das and Anuradda Ganesh (2002) [26] : ดำเนินการศึกษากาการผลิตน้ำมันชีวภาพ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิง จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบสูญญากาศ พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณผลผลิต อัตราน้ำมันชีวภาพต่อของเหลวที่สามารถผลิตได้ โดยแบ่งการผลิตน้ำมันชีวภาพออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 1. การสกัดน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้เครื่องอบที่อุณหภูมิ 105-200 °C ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 150 °C สามารถสกัดน้ำมันชีวภาพได้มากที่สุด ประมาณร้อยละ 15-16 และ 2. การสกัดน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิสูง (กระบวนการไพโรไลซิสแบบสูญญากาศ) ที่ความดัน 5 กิโลปาสกาล (kPa) ที่อุณหภูมิระหว่าง 400-600 °C ผลจากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 400 °C มีปริมาณของเหลวร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก (wt. % of Product Yield on dry CNS basic) และมากที่สุดคือร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 500-550 °C จากนั้นจะลดลงเหลือร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 °C ส่วนปริมาณถ่านที่ได้นั้นจะอยู่ระหว่างร้อยละ 19-23 โดยน้ำหนัก ปริมาณก๊าซร้อยละ 14-20 โดยน้ำหนัก สามารถผลิตปริมาณน้ำมันชีวภาพได้มากที่สุดถึงร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก (wt. % of oil on dry CNS basic) ที่อุณหภูมิ 500 °C และในส่วนของอัตราส่วนน้ำมันชีวภาพต่อของเหลว นั้นพบว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 400-550 °C มีอัตราส่วนค่อนข้างคงที่คือประมาณ 0.549-0.554 แต่ที่อุณหภูมิ 600 °C มีอัตราส่วนมากที่สุดคือ 0.590 และจากการวิเคราะห์ผลน้ำมันชีวภาพ (ที่ผลิตได้ ณ อุณหภูมิ 500 °C) พบว่าน้ำมันชีวภาพดังกล่าว มีค่าความร้อน 40 MJ/kg มีปริมาณจีเ้า ร้อยละ 0.01 และมีปริมาณน้ำปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 3-3.5 โดยน้ำหนักของน้ำมัน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวคล้ายกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้อาน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นั้นมีศักยภาพเหมือนเชื้อเพลิงเหลว

N. Tippayawong (2009) [15] : ดำเนินออกแบบ ทดสอบ และประเมินผลการใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ในระบบก๊าซซิฟิเคชันเพื่อให้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยออกแบบระบบก๊าซซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลง ที่มีลักษณะและคุณสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้ ตัวเตาปฏิกรณ์มีโครงสร้างหลักเป็นเหล็ก ภายในเตาปฏิกรณ์เป็นอิฐทนไฟ บุฉนวนกันความร้อน มีระบบอัดอากาศ มีระบบควบคุมการรั่วไหลของอากาศด้วย

น้ำทางด้านล่าง มีพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง 0.10 ตารางเมตร และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 22 kg/hr ใช้เวลาในการจุดไฟเพื่อให้เกิดก๊าซประมาณ 20 นาที สำหรับก๊าซที่ผลิตได้จะถูกเผาไหม้ที่หัวเผาเพื่อให้ความร้อนในการต้มน้ำ ซึ่งจากการทดสอบระบบพบว่า ก๊าซที่ผลิตได้มีค่าความร้อน 3.15 MJ ต่อลูกบาศก์เมตร มีอุณหภูมิก๊าซอยู่ระหว่าง 170-300 °C อุณหภูมิเปลวไฟ 650-800 °C มีของเสียที่เกิดจากระบบ (ขี้เถ้า และถ่าน) ร้อยละ 10 และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน ร้อยละ 20



รูปที่ 1-6 ระบบก๊าซซิฟิเคชันเพื่อให้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

R.N. Singhn (2005) [27] : ดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิงในระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเปิดฝา ขนาด 150,000 กิโลแคลอรีต่อชั่วโมง (kcal/h) อัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงสุด 60 kg/h โดยดำเนินการทดสอบการเผาไหม้พร้อมทั้งประเมินผลค่าต่างๆ คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง ค่าความร้อนของก๊าซ ประสิทธิภาพของระบบก๊าซซิฟิเคชัน ที่ความแตกต่างของอัตราการไหล ของก๊าซเชื้อเพลิง (60 87 และ 103 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลพบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ร้อยละ 70 ที่อัตราการไหลของก๊าซ 130 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/h) อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาผลิตก๊าซในเวลา 1 ชั่วโมง (kg/h) ต่อพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง (m^2) (Specific Gasification Rate: SGR) 167 kg/h-m^2 จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบก๊าซซิฟิเคชันแบบฝาเปิดได้

1.4 ทฤษฎี และหลักการ

ในขั้นตอนการเริ่มศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ จากหนังสือในห้องสมุด อินเทอร์เน็ต งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และบทความหรือเอกสารตีพิมพ์ทางวิชาการต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงความก้าวหน้าของงานวิจัย พร้อมทั้งหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นการสืบค้นหาข้อมูลเกี่ยวกับชีวมวล มะม่วงหิมพานต์ หลักการและทฤษฎีของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คุณสมบัติของน้ำกึ่งวิกฤต พฤติกรรมของน้ำภายในปริมาตรปิด ปริมาณพลังงานความร้อนที่ให้กับน้ำ และถึงปฏิกิริยาความดันสูง การสูญเสียความร้อน การออกแบบภาชนะรับความดัน รวมไปถึง การศึกษาวิธีการตรวจวิเคราะห์และหาปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ การตรวจวิเคราะห์ค่าความร้อน และคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เพื่อให้ทราบถึงหลักการต่างๆ อย่างครบถ้วนก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลอง ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1.4.1 ชีวมวล

ชีวมวล [1] [5] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยสารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น พืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม้ และเศษไม้ หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน ซึ่งชีวมวลจะประกอบไปด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ยกเว้นสิ่งมีชีวิตที่ได้กลายเป็นเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติไปแล้ว) โดยทั่วไปสามารถจำแนกชีวมวลตามแหล่งที่มาได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- 1) พืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้
- 2) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง
- 3) ไม้และเศษไม้ เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น
- 4) ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ จี้เลื่อย เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงเราก็จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งทีละมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง

1.4.2 องค์ประกอบของชีวมวล

โดยทั่วไปชีวมวลแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบของ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) แป้ง โปรตีน และสารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์) ปริมาณของสารเหล่านี้ในชีวมวลแต่ละชนิดจะมีแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สภาพที่เจริญเติบโต อายุ และส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วชีวมวลจะประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 40-60 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20-40 และลิกนินประมาณร้อยละ 10-25 ของปริมาณชีวมวลแห้ง ดังแสดงโครงสร้างองค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลดังรูปที่ 1-7 และรายละเอียดต่อไปนี้

1) เซลลูโลส

เซลลูโลสชีวภาพ (Cellulosic Biomass) หมายถึง สารที่มีองค์ประกอบหลักอย่างแรกเป็นเซลลูโลส และมีองค์ประกอบหลักอื่นๆ คือ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ส่วนองค์ประกอบรองจะเป็นพวกโปรตีน ไขมัน แป้ง และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ

เซลลูโลส เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสหลายโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่ การจัดเรียงตัวของกลูโคสจะอยู่ในลักษณะรูปเก้าอี้แต่ละโมเลกุลจับกันด้วยพันธะไกลโคสิดิคระหว่างคาร์บอนตัวที่หนึ่งของกลูโคสกับคาร์บอนตัวที่สี่ของกลูโคสตัวถัดไป การเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่มีแขนงย่อย มีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือจำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างจำนวนเซลลูโลสในสายกลูโคสไม่สามารถทราบจำนวนที่แท้จริงได้ เนื่องจากระหว่างสาย

เซลลูโลสจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งเรียงแน่นเป็นมันไมโครไฟบริลจึงมีความแข็งแรงและไม่ละลายน้ำหรือสารอินทรีย์ใดๆ

2) เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตสซึ่งส่วนมากเป็น ดี-ไซแลน ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโตสหลาย ๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1-4 ไกลโคสิติกสายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ประกอบด้วยโพลีแซ็กคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ เพนโตแซน ส่วนใหญ่เป็นไซแลนและอะราบานเมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโตสและอะราบิโนสไซแลนเป็น สารที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าสารอื่นเฮกโซแซน ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน กาแลกแทน และกลูแคน เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส กาแลกโตส และกลูโคส ตามลำดับ โพลีเมอร์ในนี้ ส่วนมากเป็นสารประกอบของกรดโพลีเมอร์และยังพบกรดยูโรนิกปนอยู่ด้วย

3) ลิกนิน

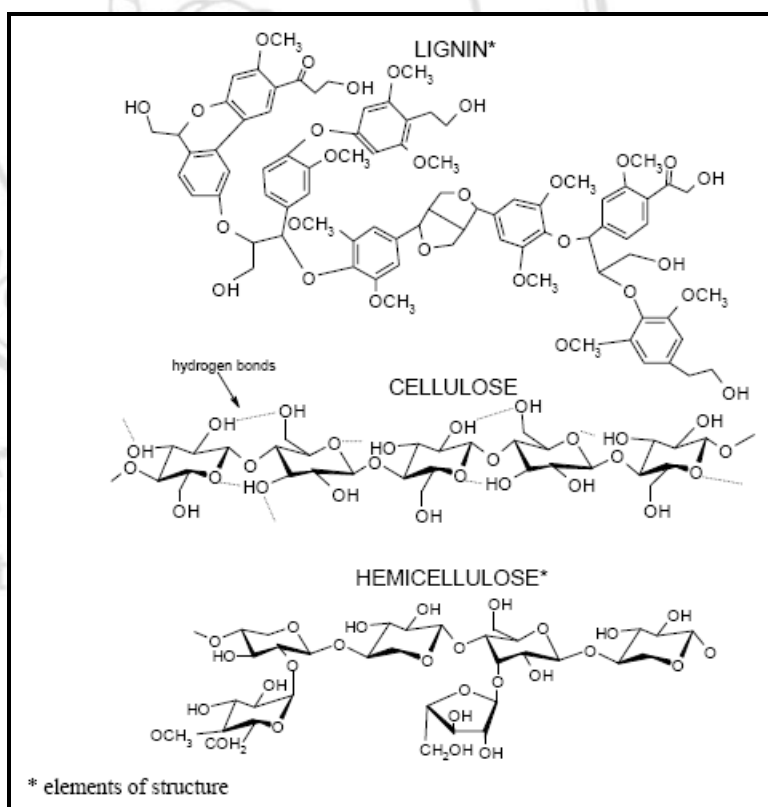
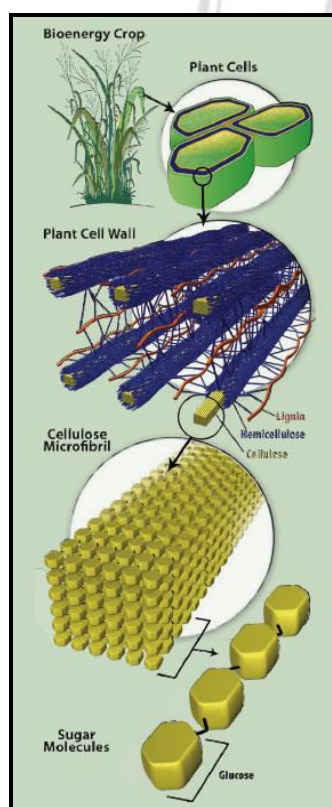
ลิกนิน เป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติกหรือที่เรียกว่าเป็น ฟีนอลิกโพลีเมอร์ โดยมีหน่วยฟีนิลโพรเพน เรียงต่อกันแบบสุ่มที่หน่วยฟีนอลอาจเป็นกัวอีเอซิล หรือไซริงกิลที่ตำแหน่งแอลฟา และเบต้าของโมเลกุลลิกนิน อาจเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลหรือคาร์บอนในหน่วยฟีนอลอาจเกิดพันธะในอีกหน่วยหนึ่ง ซึ่งภายในสายโพลีเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลลิกนิน ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น ในเอทานอลหรือเมทานอลที่ร้อน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปกติลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืชบริเวณรอบๆ เซลลูโลสโดยเป็นตัวป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยอีกด้วย

ตารางที่ 1-3 แสดงปริมาณองค์ประกอบของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และของเสียอื่นๆ [28]

ลำดับที่	ชนิดของวัสดุ	ปริมาณองค์ประกอบ (% dry basic)		
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
1	ไม้			
	ไม้เนื้อแข็ง	48.5-49.6	25.1-26.7	19.4-23.1
	ไม้เนื้ออ่อน	41.7-44.8	20.5-30.9	25.9-27.1

ตารางที่ 1-3 (ต่อ) แสดงปริมาณองค์ประกอบของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และของเสียอื่นๆ [28]

ลำดับ ที่	ชนิดของวัสดุ	ปริมาณองค์ประกอบ (% dry basic)		
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
2	วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร			
	ลำต้นข้าวโพด	37.1	24.2	18.2
	ชานอ้อย	39.0	24.9	23.1
	ฟางข้าว	44.5	24.3	21.3
3	ของเสียอื่นๆ			
	กระดาษหนังสือพิมพ์	40-55	25-40	18-30
	ของเสียจากมูลสัตว์	6.0	28	-
	หญ้า	45	31.4	12.0



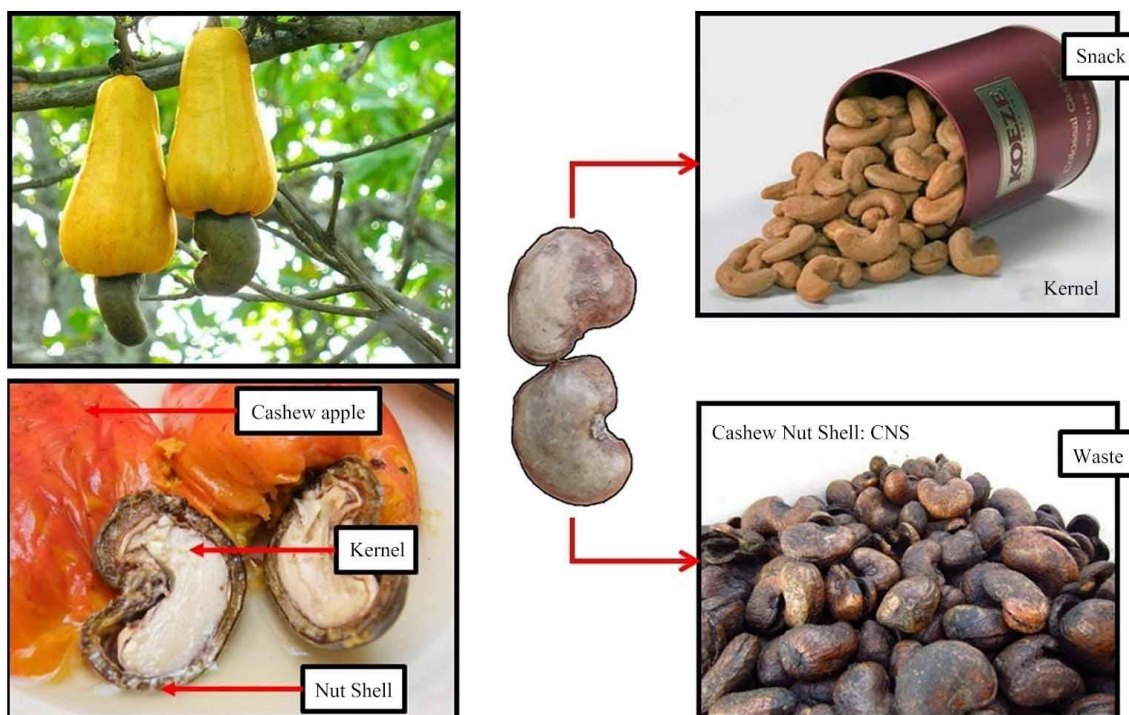
รูปที่ 1-7 โครงสร้าง Lignin Cellulose และ Hemicellulose ในองค์ประกอบของ
ลิกโนเซลลูโลสของเชื้อเพลิงชีวมวล [29]

1.4.3 มะม่วงหิมพานต์

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชพื้นเมืองของประเทศบราซิล มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium Occidentale* Linn อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยอินเดียและแอฟริกาตะวันออก โดยชาวโปรตุเกสในคริสต์ศตวรรษที่ 16 เป็นพืชเขตร้อนที่มีใบเขียวตลอดปี และเติบโตที่ระดับความสูงต่ำกว่า 1,000 ฟุต นอกจากนั้นพืชชนิดนี้ก็แพร่หลายในเกาะอันดามัน โมซัมบิก แทนซาเนีย ฟิลิปปินส์ และประเทศในเขตร้อนอื่นๆ [30] [31] สำหรับมะม่วงหิมพานต์ในประเทศไทยนั้น ไม่มีหลักฐานยืนยันที่แน่ชัดว่าเข้ามาตั้งแต่เมื่อไหร่ แต่พอสันนิษฐานได้ว่าประมาณปีพุทธศักราช 2444 พระยารัษฎานุประดิษฐ์ (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ขณะดำรงตำแหน่งเทศาภิบาล เป็นคนแรกที่น่าเอาเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาจากมาเลเซีย มาปลูกที่จังหวัดตรัง [32]

มะม่วงหิมพานต์เป็นไม้ผลเมืองร้อน ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่ง และเป็นพืชเอนกประสงค์ ทั้งนี้เพราะสามารถนำส่วนต่างๆ ของต้นมาใช้ประโยชน์ได้มาก ตั้งแต่ ราก ลำต้น เปลือก ใบ ยอดอ่อน ผลจริง ผลปลอม น้ำมันจากเปลือกผล เยื่อหุ้มเมล็ดใน และเมล็ดใน [33] แต่ส่วนที่สำคัญที่มีค่าในเชิงการค้าขณะนี้ก็มีเพียงสองส่วนคือ เมล็ดในสำหรับบริโภคเป็นอาหาร และน้ำมันจากเปลือกผลเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์และอุตสาหกรรม

ผลจริงของมะม่วงหิมพานต์ คือส่วนที่เรียกว่าเมล็ด ที่ติดอยู่ตรงปลายก้านดอก (ดังรูปที่ 1-8) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Shell) มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 55-65 (ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ปริมาณร้อยละ 40-45 20-40 และ 17-30 ตามลำดับ) [34] เยื่อหุ้มเปลือก (Cashew Testa) และเมล็ดใน (Cashew Kernel) มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 35-45 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อนำมาบดและสกัดจะได้น้ำมันเหลวข้นสีน้ำตาลเข้ม เรียกว่า Cashew Nut Shell Liquid [35] ประมาณร้อยละ 15-30 โดยน้ำหนัก [30] มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) ทุกชนิด เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันได้รับความร้อนสูง บางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุนจัด กัดเยื่อเมือกและเยื่อตา [35] ในน้ำมันจะมีสารหลักๆ สองชนิดคือ กรดอนาคาร์ดิก (Anacardic acid) ประมาณร้อยละ 80-90 และคาร์ดอล (Cardol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่ง อีกร้อยละ 10-20 นอกจากนี้ยังมีอนุพันธ์ต่างๆ ของสารหลักสองชนิดนี้อีกเล็กน้อยผสมอยู่ด้วย [36]



รูปที่ 1-8 รูปร่างลักษณะของเมล็ด และเปลือกของมะม่วงหิมพานต์

ของเหลว หรือน้ำมันที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะนำไปใช้ทางการแพทย์ โดยจะใช้ทำยาแก้โรคเหน็บชา เลือดคั่ง โรคเท้าช้าง โรคผิวหนังและโรคเท้าแตก ส่วนในทางอุตสาหกรรม นิยมใช้ทำผ้าเบรค และผ้าคลรัช เพราะมีคุณสมบัติทนต่อความร้อน ทนต่อแรงเสียดทานได้ดี (Antifriction) ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า กระเบื้อง ยางปูพื้น น้ำมันวาร์นิช ใช้ทำเรซิน Phenolic ใช้ผสมกับน้ำมันพืชบางชนิดสามารถทำเป็นกร หรือใช้ผสมกับน้ำมันก๊าดใช้กำจัดตัวอ่อนยุง เป็นต้น [35] และในส่วนของเปลือกที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันแล้วจะนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์ [25] นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ [15] ฯลฯ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิต และวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

จากข้อมูลตารางที่ 1-4 จะสังเกตได้ว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มี ค่าความร้อนอยู่ระหว่างร้อยละ 6-11 โดยน้ำหนัก ค่าสารระเหยอยู่ระหว่างร้อยละ 65-82 โดยน้ำหนัก ค่าความร้อนสูงอยู่ระหว่าง 20-24 MJ/kg ค่าความร้อนต่ำ 18-23 MJ/kg จี๊ไถร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก น้ำมัน CNSL ร้อยละ 8.3 ซึ่งจากคุณสมบัติเบื้องต้นดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นั้นมีค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น ค่าความร้อน ฯลฯ ที่ใกล้เคียงกับชีวมวลบางประเภท เช่น ไม้พิน แกลบ ฯลฯ อีกทั้งประกอบไปด้วยสารระเหย และน้ำมัน CNSL ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ หรือจะนำมาผ่านกระบวนการสกัดเพื่อนำของเหลว หรือน้ำมัน CNSL ไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ในด้านอุตสาหกรรมต่อไปได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 1-4 คุณสมบัติและองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

รายละเอียด คุณสมบัติและ องค์ประกอบ ของ เปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์	หน่วย	Das P and Ganesh A, 2003 [26]	R.N. Singh et al., 2006 [27]	A. J. Tsamba et al., 2007 [37]	Atul Mohod et al., 2011 [24]	S. H. Sengar et al., 2012 [25]
ความชื้น	(% dry basic)	10.43	6.45 (% wet basic)	-	6.47 (% wet basic)	10-11
สารระเหย	(% dry basic)	69.31	79.54	81.8	72.00	65-70
คาร์บอนคงตัว	(% wt./wt.)	19.26	18.93	17.3	20.48	-
คาร์บอน (C)	(% wt./wt.)	48.70	-	58.30	-	60-62
ไฮโดรเจน (H)	(% wt./wt.)	6.96	-	7.00	-	6-7
ไนโตรเจน (N)	(% wt./wt.)	0.36	-	0.70	-	0.70-0.75
ออกซิเจน (O)	(% wt./wt.)	42.96	-	32.05	-	29-31
ค่าความร้อนสูง (HHV)	(MJ/kg)	-	-	24.05	20.47	20.93
ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	(MJ/kg)	17.60	17.80	22.54	-	-
เถ้า	(% wt./wt.)	1.00	1.53	1.9	1.05	1.27-3.34
น้ำมัน CNSL	(% wt./wt.)	-	8.30	-	-	-

ในส่วนของการปรับปรุงคุณภาพ หรือการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การนำไปผ่านกระบวนการทำถ่าน การสกัดน้ำมัน CNSL โดยการบีบอัด การสกัดน้ำมัน CNSL โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส หรือการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ในระบบก๊าซซิฟิเคชัน ฯลฯ จากแนวทางการใช้ประโยชน์ข้างต้นจะสามารถสร้างผลิตภัณฑ์หลักๆ ออกมาอยู่ 3 สถานะ คือ 1. ก๊าซ ที่เกิดขึ้นในระบบการเผาไหม้แบบก๊าซซิฟิเคชัน หรือกระบวนการไพโรไลซิส 2. ของแข็ง เช่น ถ่าน เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมัน ฯลฯ 3. ของเหลว ซึ่งจะอยู่ในรูปของน้ำมัน CNSL ฯลฯ ซึ่งผลผลิตที่ได้จะมีคุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของถ่าน Cashew Nut Shell Char (CNSC) ดังตารางที่ 1-5 และของเหลว หรือน้ำมัน CNSL ดังตารางที่ 1-6 ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว หรือน้ำมัน CNSL เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของน้ำมัน CNSL ที่มีค่าความร้อนสูง 33-44 MJ/kg

เปรียบเทียบกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันดีเซล 42-46 MJ/kg (K. Pramanik., 2003) และน้ำมันเตา 42.1 MJ/kg (A. Saario., 2004) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงของน้ำมัน CNSL มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของน้ำมันทั้งสองชนิด ดังนั้นจึงเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการศึกษาค้นคว้าแนวทางการปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน CNSL เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ทดแทนน้ำมันเตาหรือเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ก๊าซหุงต้ม ฯลฯ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่า และแนวทางการนำน้ำมัน CNSL ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ นอกเหนือจากการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม และการแพทย์ต่อไป

จากข้อมูลในตารางที่ 1-5 จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง คือ ถ่าน CNSC จะมีคุณสมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ค่าความร้อนสูงที่เพิ่มสูงขึ้นเป็น 28.1 MJ/kg มีค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 59 โดยน้ำหนัก และสารระเหยมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 28.1 โดยน้ำหนัก จีเอาร์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ่านไม้ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์เชชั่น มีค่าความร้อนสูง 22.5 MJ/kg มีค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 53.5-60.0 โดยน้ำหนัก และสารระเหยร้อยละ 21.6-32.2 โดยน้ำหนัก จีเอาร์ร้อยละ 5.8-9.7 [38] พบว่าถ่าน CNSC มีค่าความร้อนสูงที่สูงกว่าถ่านไม้ประมาณ 5.6 MJ/kg ดังนั้นถ่าน CNSC จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ได้

ตารางที่ 1-5 คุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

รายละเอียดคุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่าน CNSC	หน่วย	Das P and Ganesh A, 2003 [26]	M. Venkata Ramanan et al., 2008 [39]	S. H. Sengar et al., 2012 [25]
กระบวนการผลิต	-	Pyrolysis (High Temp)	Carbonization	Carbonization
%Yield	%	19-23	-	18.45-21.04
ค่าความร้อนสูง (HHV)	(MJ/kg)	-	-	28.11
สารระเหย	(% dry basic)	-	28	25-30
คาร์บอนคงตัว	(% wt./wt.)	-	59	-
Ash	(% wt./wt.)	-	6	-
คาร์บอน (C)	(% wt./wt.)	-	63	73-76
ไฮโดรเจน (H)	(% wt./wt.)	-	3.6	4-5

ตารางที่ 1-5 (ต่อ) คุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

รายละเอียดคุณสมบัติ และองค์ประกอบของ ถ่าน CNSC	หน่วย	Das P and Ganesh A, 2003 [26]	M. Venkata Ramanan et al., 2008 [39]	S. H. Sengar et al., 2012 [25]
ไนโตรเจน (N)	(% wt./wt.)	-	6.4	1-2
ออกซิเจน (O)	(% wt./wt.)	-	27	13-14

ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว หรือน้ำมัน CNSL (ตารางที่ 1-6) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของน้ำมัน CNSL ที่มีค่าความร้อนสูง 33-44 MJ/kg เปรียบเทียบกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันดีเซล 42-46 MJ/kg [40] และน้ำมันเตา 42.1 MJ/kg [41] จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงของน้ำมัน CNSL มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของน้ำมันทั้งสองชนิด ดังนั้นจึงเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการศึกษาค้นคว้าแนวทางการปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน CNSL เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ทดแทนน้ำมันเตาหรือเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ก๊าซหุงต้ม ฯลฯ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่า และแนวทางการนำน้ำมัน CNSL ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ นอกเหนือจากการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม และการแพทย์ต่อไป



รูปที่ 1-9 ลักษณะน้ำมัน CNSL ที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [42] [43]

ตารางที่ 1-6 คุณสมบัติและองค์ประกอบของเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

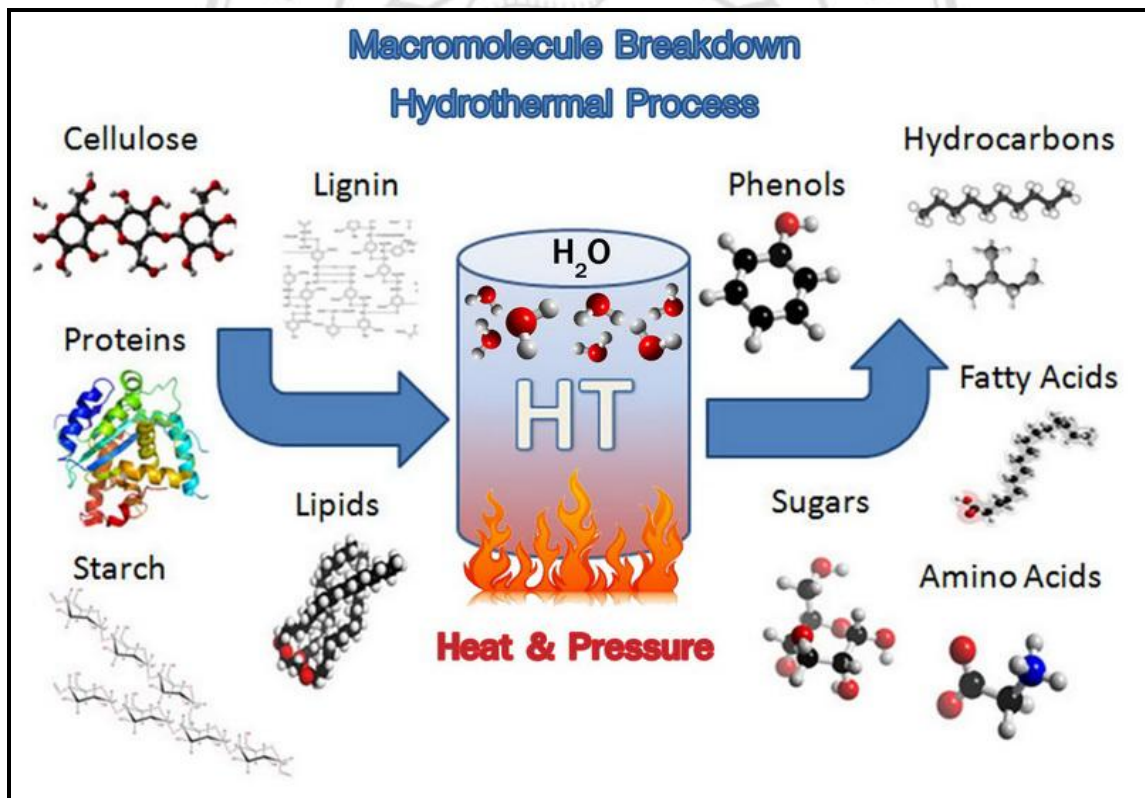
รายละเอียดคุณสมบัติและองค์ประกอบของเหลว CNSL	หน่วย	Das P and Ganesh A, 2003 [26]	S. H. Sengar et al., 2012 [25]
กระบวนการผลิต	-	Pyrolysis (High Temp)	Carbonization
%Yield	%	36-42	21.1-23.8
ค่าความร้อนสูง	(MJ/kg)	33-40	44.11
ความชื้น	(% dry basic)	3-3.5	-
ความหนาแน่น	kg/m ³	0.993	0.957
Flash point	°C	164-180	114
Fire point	°C	-	118
Pour Point	°C	-5	-
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-	-	5.7
คาร์บอน (C)	(% wt./wt.)	76.4-79.9	-
ไฮโดรเจน (H)	(% wt./wt.)	10.5-11.8	-
ไนโตรเจน (N)	(% wt./wt.)	<0.2	-
ออกซิเจน (O)	(% wt./wt.)	8.1-12.9	-

1.4.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

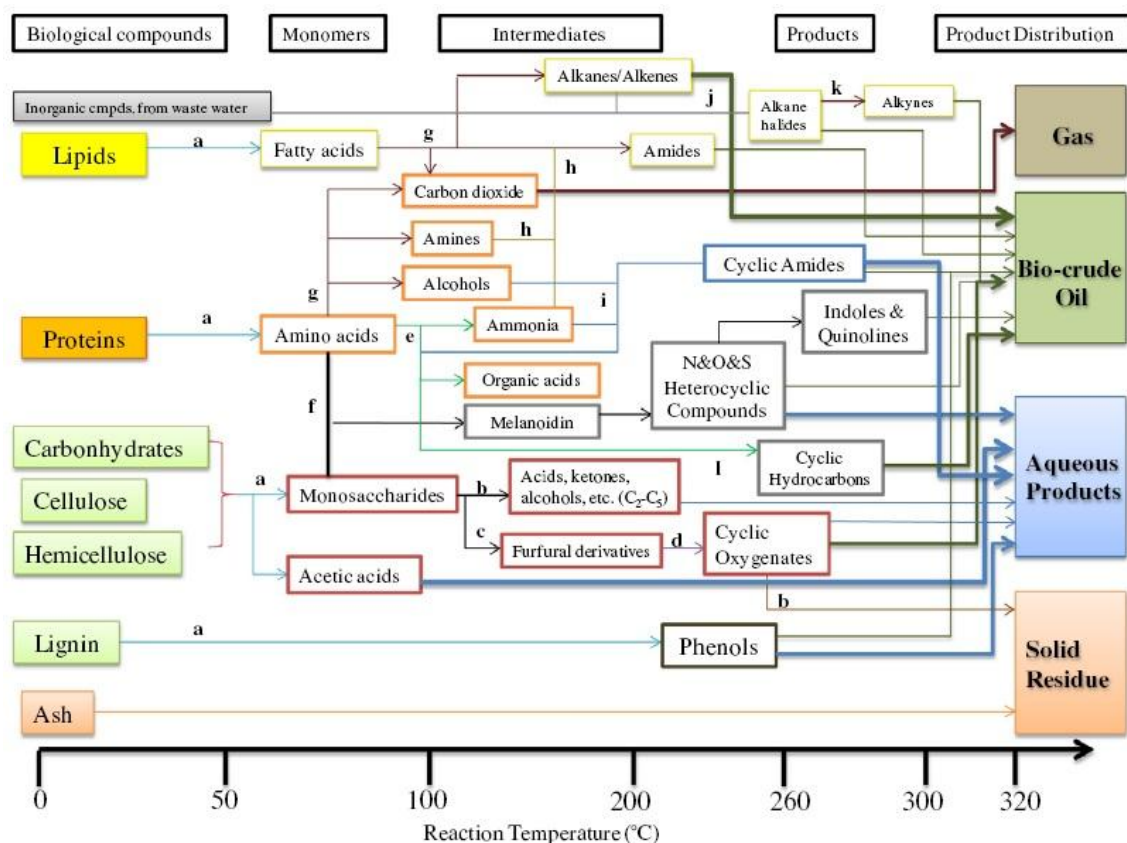
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process: HT) เป็นกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในส่วนของการแปลงชีวมวลด้วยเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Conversion :TCC) อันมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการลดขนาด เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และเคมีของชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ เช่น เศษไม้ แกลบ ชังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง ฯลฯ และความชื้นสูง เช่น มูลสัตว์ ผักตบชวา สาหร่ายน้ำมัน ฯลฯ ให้อยู่ในรูปถ่านชีวภาพ และ/หรือน้ำมันชีวภาพ ที่มีค่าความร้อน ต่อหน่วยที่สูงขึ้น [10] โดยใช้ น้ำ ณ สภาวะได้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 200-350 °C ความดัน 1.5-20 MPa เป็นสื่อกลางในการนำความร้อน และในบางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาให้สั้นลง หรือเพื่อเพิ่มผลผลิต ทั้งนี้ลักษณะของกระบวนการดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน

ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ที่เกิดการทับถมของซากพืช ซากสัตว์ ภายใต้อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาหลายล้านปี แต่ในทางกลับกันกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะใช้ ระยะเวลาที่สั้นกว่าการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติเป็นอย่างมาก อีกทั้งกระบวนการดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สามารถแบ่งตามสถานะของผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการ ทำปฏิกิริยาออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1. ไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดแฟกชัน (Hydrothermal Liquefaction: HTL) [28] [44] [45] และ 2. ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC) [13] ทั้งนี้ผลผลิตที่สำคัญของทั้งสองกระบวนการจะประกอบไปด้วย ของแข็ง คือ ถ่านชีวภาพ และเชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ ซึ่งในแต่ละกระบวนการอาจจะ ใช้อุณหภูมิ ความดัน ตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ประสิทธิภาพ วัตถุดิบตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป



รูปที่ 1-10 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวล [46]

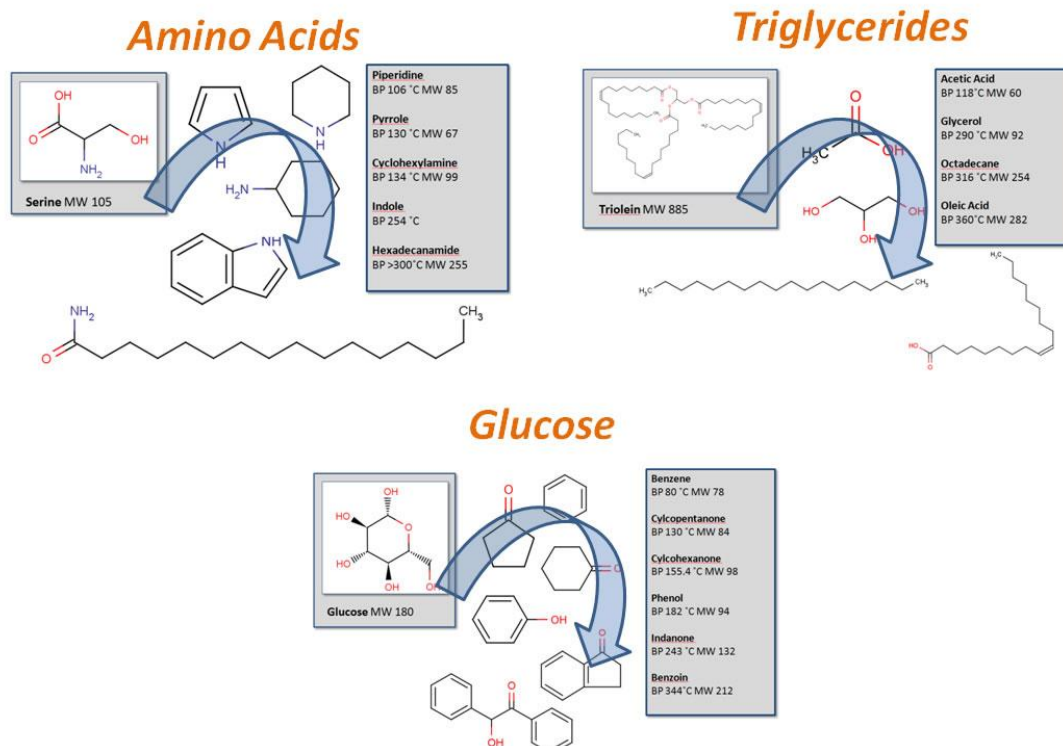


รูปที่ 1-11 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

(a) Hydrolysis; (b) Decomposition; (c) Dehydration; (d) Polymerization; (e) Deamination; (f) Maillard reaction; (g) Decarboxylation; (h) Aminolysis; (i) Cyclization; (j) Halogenations; (k) Dehydrohalogenation; (l) Condensation + Pyrolysis.[47]

1) ไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน

ไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน [27] เป็นกระบวนการที่อาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 250-350 °C และความดัน 4-20 MPa บางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยในการย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวลที่มีน้ำมันและความชื้นสูง (>50 %db) เช่น สาหร่าย ผักตบชวา เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ฯลฯ ให้เป็นของเหลว (ดังรูปที่ 1-12) โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายรูปแบบคล้ายกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนซ์เซชัน แต่จะแตกต่างกันที่ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการจะเป็นของเหลวที่เรียกว่า “เชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ”

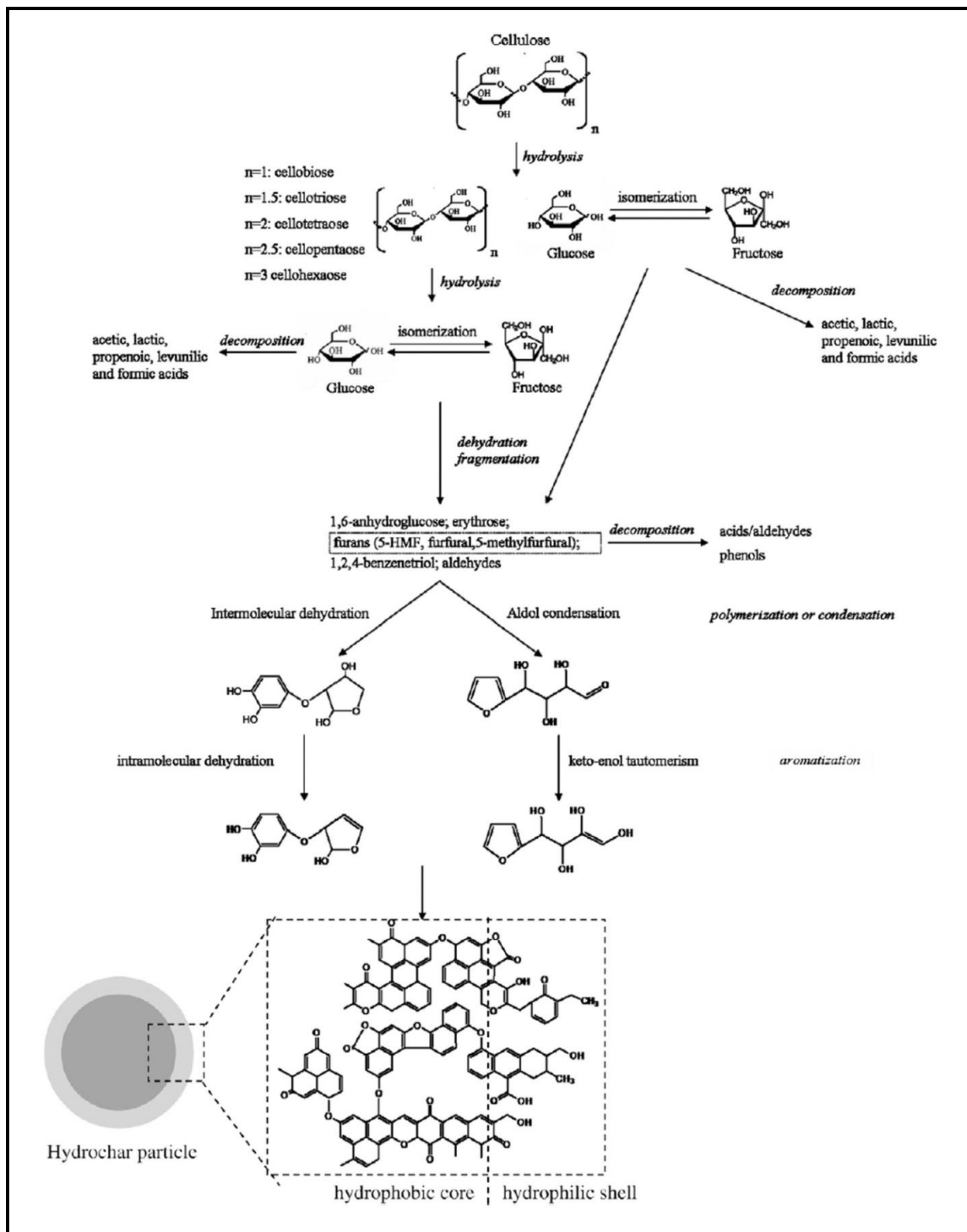


รูปที่ 1-12 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟกชั่น [46]

2) ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน [21] คือ กระบวนการทางเคมีความร้อน (ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาหลายรูปแบบ เช่น ไฮโดรไลซิส¹ (Hydrolysis) ดีไฮเดรชัน (Dehydration) ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และ อโรมาติกเซชัน (Aromatization) [21] เป็นต้น ที่อาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 200-250 °C และภายใต้สภาวะความดัน 1.5-4 MPa เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อนให้แก่ชีวมวล เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และสถานะของชีวมวล (ดังรูปที่ 1-13) ให้อยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการก็คือ “ถ่านชีวภาพ”

¹ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) คือ ปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง



รูปที่ 1-13 กลไกการเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันของเซลลูโลส [8]

ตารางที่ 1-7 รายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน

ลำดับ ที่	รายละเอียด	กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน				
		M. K. Akah, et al., 2012 [9]	S. Xiu, et al., 2010 [18]	K. Tekina, et al., 2012 [19]	D. Zhou, et al., 2010 [20]	Y. Qu, et al., 2003 [12]
1	ผลิตภัณฑ์ตั้งต้น	ผลเชอรี่	มูลสุกร	ไม้บีช	สาหร่าย เอ็นเทอโรมอร์ฟาโปรลิเฟรา	ไม้สน
2	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ตั้งต้น (HHV) (MJ/kg)	15.85	7.9	N/A	N/A	18.20
3	อัตราส่วนระหว่างผลิตภัณฑ์ (g) ต่อน้ำ (ml)	1 : 10	N/A	1 : 10	2 : 15	8 10 12.5 : 100
4	ตัวเร่งปฏิกิริยา	N/A	N/A	Calcium borate (Ca ₃ (BO ₃) ₂) and Colemanite	โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃)	N/A
5	อุณหภูมิ (°C)	200 250 300	260-340	250 300 350	220-320	280-360
6	ความดัน (MPa)	N/A	0-1 (0 – 150 psi)	4.0 8.5 16.5	2.0	N/A
7	ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา	0 15 30	0-90	N/A	30	10-30
8	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	Bio-oil	Bio-oil	Bio-oil (LBO & HBO)	Bio-oil	Bio-oil Residue

ตารางที่ 1-7 (ต่อ) รายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน

ลำดับ ที่	รายละเอียด	กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน					
		M. K. Akah, et al., 2012 [9]	S. Xiu, et al., 2010 [18]	K. Tekina, et al., 2012 [19]	D. Zhou, et al., 2010 [20]	Y. Qu, et al., 2003 [12]	
9	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ (MJ/kg)	23.86-28.35	36.05	23.81 (LBO) & 27.53 (HBO)	28-30	27.06- 30.22	26.83- 28.62
10	%Yield (%)	28	14.9-24.2	22-41 (Total Bio-oils)	23	25.80- 34.11	30.29- 39.96

ตารางที่ 1-8 รายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน

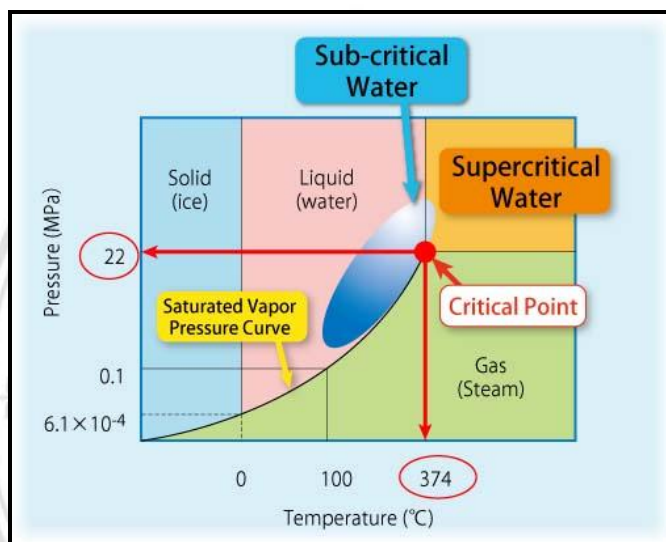
ลำดับ ที่	รายละเอียด	กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน					
		D. Schneider et al., 2011 [21]	S. Kent Hoekman et al., 2011 [22]	N. Worasuwannarak et al., 2006 [14]	M. Nonaka et al., 2011 [23]	P. Prawisudha et al., 2012 [11]	I. H. Hwang et al., 2012 [8]
1	ผลิตภัณฑ์ตั้งต้น	ไม้ไผ่	ไม้สน	ซังข้าวโพด	ถ่านหิน คุณภาพต่ำ และชีวมวล	ขยะมูลฝอยชุมชน	ขยะมูลฝอย ชุมชน

ตารางที่ 1-8 (ต่อ) รายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน

ลำดับ ที่	รายละเอียด	กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนซ์เซชัน					
		D. Schneider et al., 2011 [21]	S. Kent Hoekman et al., 2011 [22]	N. Worasuwannarak et al., 2006 [14]	M. Nonaka et al., 2011 [23]	P. Prawisudha et al., 2012 [11]	I. H. Hwang et al., 2012 [8]
2	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ตั้งต้น (MJ/kg)	16.8	20.3	19.8 (4,722.9 cal/g)	20.3-20.5	20.0-24.2	N/A
3	อัตราส่วนระหว่างผลิตภัณฑ์ (g) ต่อ น้ำ (ml)	1 : 30	1 : 8	1 : 1-7	N/A	599 (kg) :706 (litre)	5 : 15
4	ตัวเร่งปฏิกิริยา	กรดออกซาลิก (Oxalic Acid)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5	อุณหภูมิ (°C)	220	215-295	300 - 350	300	215-235	234-295
6	ความดัน (MPa)	2.2	4-5	10 - 18	12	2.0-2.6	3-8
7	ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา	6 hr	5-60 min	30 min	30 min	30 – 90 min	20 – 90 min
8	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	Bio char	Char	Char	Char	Solid fuel	Solid fuel
9	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ (MJ/kg)	28.7	22.6-29.5	29.5-34.9 (7,048.5-8,334.8 cal/g)	26.4-30.2	23.7-27.3	13.8-27.5
10	%Yield (%)	N/A	50-70	36.4-49.8	N/A	N/A	51-1 (Plastics)

1.4.5 คุณสมบัติของน้ำกึ่งวิกฤต [48] [49]

จากแผนภูมิวัฏภาคน้ำ (ดังรูปที่ 1-14) จะเห็นได้ว่าน้ำกึ่งวิกฤต คือ น้ำที่มีอุณหภูมิระหว่างจุดเดือดของน้ำ (100 °C) ความดัน 0.1 MPa ถึง จุดวิกฤตของน้ำ (374 °C) น้ำ ความดัน 22 MPa ณ สภาวะดังกล่าวน้ำจะมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างไปจากสภาวะปกติ เช่น จะมีความสามารถในการทำละลายที่เหนือกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลว ฯลฯ

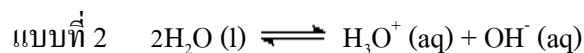


รูปที่ 1-14 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำ ณ สภาวะอุณหภูมิ และความดันต่างๆ [42]

คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำกึ่งวิกฤตที่แตกต่างไปจากน้ำที่สภาวะปกติ ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าคงที่การแตกตัว พิจารณารูปที่ 1-15 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant: ϵ_{RDC}) ของน้ำ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความเป็นขั้วของโมเลกุลลดลงจาก 79.0 ที่อุณหภูมิ 25 °C เหลือเพียง 35.5 °C ที่อุณหภูมิ 200 °C และเหลือเพียง 20.7 ที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งเป็นค่าในระดับเดียวกันกับตัวทำละลายอย่างเมทานอล (มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เท่ากับ 32.7 ที่อุณหภูมิ 25 °C) และอะซิโตน (มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เท่ากับ 20.7 ที่อุณหภูมิ 25 °C) จากคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ทำให้น้ำกึ่งวิกฤตมีพฤติกรรมคล้ายกับตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และสามารถทำละลายสารประกอบที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าน้ำที่สภาวะปกติมาก ทำให้สามารถสกัดและเข้าทำปฏิกิริยากับสารกลุ่มนี้ได้ดี

คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการของน้ำกึ่งวิกฤต คือ ค่าคงที่การแตกตัว (K_w) จะสามารถอธิบายได้ โดยน้ำที่ได้รับพลังงานจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยในสภาวะปกติจะแตกตัวได้น้อย

และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น ทั้งนี้สามารถแสดงในรูปของสมการเคมีที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบดังต่อไปนี้



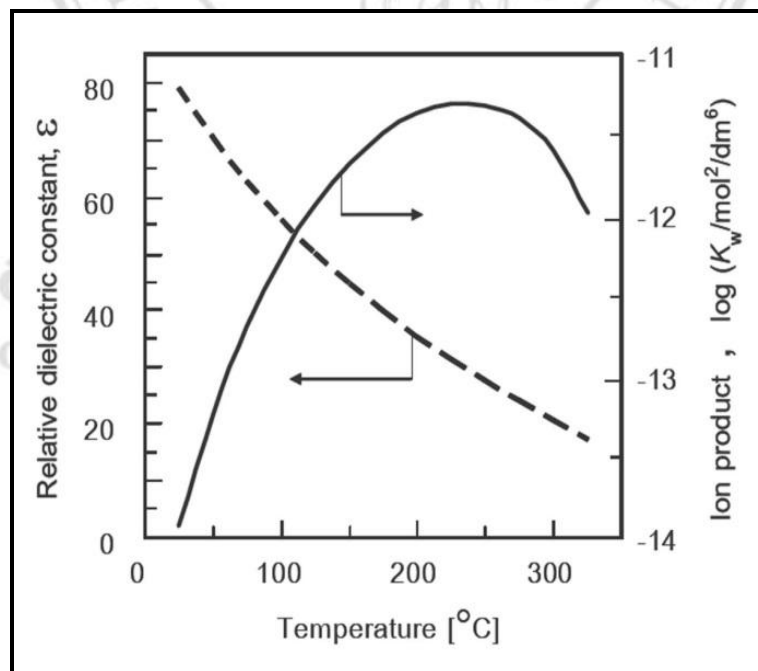
ที่อุณหภูมิ 25 °C ณ ความดันบรรยากาศ น้ำกลั่นบริสุทธิ์จะมีค่าคงที่การแตกตัว (K_w) เท่ากับ

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = [1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/dm}^3][1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/dm}^3]$$

$$K_w = 1.0 \times 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{dm}^6$$

$$\text{หรือ } \text{Log}(K_w) = -14.0$$

จากรูปที่ 1-15 ที่ความดัน 15 MPa ค่า $\text{Log}(K_w / \text{mol}^2/\text{dm}^6)$ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก -14 ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น -11.3 ที่อุณหภูมิในช่วง 200-250 °C แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไฮโดรเนียม (H_3O^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้นจาก $1 \times 10^{-7} \text{ mol/dm}^3$ ไปเป็น $2.2 \times 10^{-6} \text{ mol/dm}^3$ หรือมากกว่า 20 เท่า ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่การแตกตัวนั้นจะเป็นปัจจัยที่เร่งปฏิกิริยาที่เร่งด้วยกรดและเบส (Acid-base Catalyst) เช่นเดียวกับที่เกิดในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



รูปที่ 1-15 การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ และค่าคงที่การแตกตัวของน้ำตามอุณหภูมิที่สัมบูรณ์ 15 MPa

ตารางที่ 1-9 คุณสมบัติของน้ำ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ [28]

ลำดับ ที่	รายละเอียด	Normal	Subcritical		Supercritical	
		water	water		water	
1	Temp. (°C)	25	250	350	400	400
2	Pressure (MPa)	0.1	5	25	25	50
3	Density, ρ (g cm ⁻³)	1	0.80	0.6	0.17	0.58
4	Heat capacity, C_p (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	4.22	4.86	10.1	13.0	6.8
5	Dynamic viscosity, η (mPa s)	0.89	0.11	0.064	0.03	0.07
6	Relative dielectric constant, ϵ_{RDC} (Fm ⁻¹)	78.5	27.1	14.07	5.9	10.5
7	Ionic product, pK_w	14.0	11.2	12.0	19.4	11.9

1.4.6 พฤติกรรมของน้ำภายในปริมาตรปิด [50]

พฤติกรรมของน้ำที่สภาวะวิกฤต อาจศึกษาได้จากการให้ความร้อนกับน้ำในภาชนะปิดที่มีปริมาตรคงที่ ตามเส้นทางของเส้นประแนวตั้งซึ่งขนานกับแกน P ในแผนภาพ P-V (รูปที่ 1-16 b) กระบวนการดังกล่าวยังสามารถแสดงในแผนภาพ P-T ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1-17 โดยที่เส้นทึบในรูปคือเส้นการกลายเป็นไอและเส้นประคือเส้นปริมาตรคงที่

ในกรณีที่น้ำในภาชนะปิดเป็นของเหลว (Subcooled Liquid) เพียงอย่างเดียวโดยมีปริมาตรเท่ากับ V_1 ถ้าระบบได้รับความร้อน อุณหภูมิและความดันของของเหลวนี้จะเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะที่ควบคุมให้ปริมาตรคงที่ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะตามเส้นประจากจุด E ไปยังจุด F

ส่วนกรณีที่น้ำปรากฏอยู่ในสถานะไอเพียงอย่างเดียว (Superheated Vapor) กระบวนการให้ความร้อนกับไอนี้ภายใต้สภาวะปริมาตรคงที่จะเป็นไปตามเส้นประจาก G ไป H ดังแสดงในรูปที่ 1-17 ควรสังเกตว่าในการให้ความร้อนเช่นนี้ ของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันมากกว่าไอน้ำมาก แต่ถ้าภาชนะถูกบรรจุด้วยของเหลวและไอซึ่งอยู่รวมกันในสภาวะสมดุลแล้ว การให้ความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่เป็นไปตามเส้นการกลายเป็นไอ (เส้นทึบในรูปที่ 1-17)

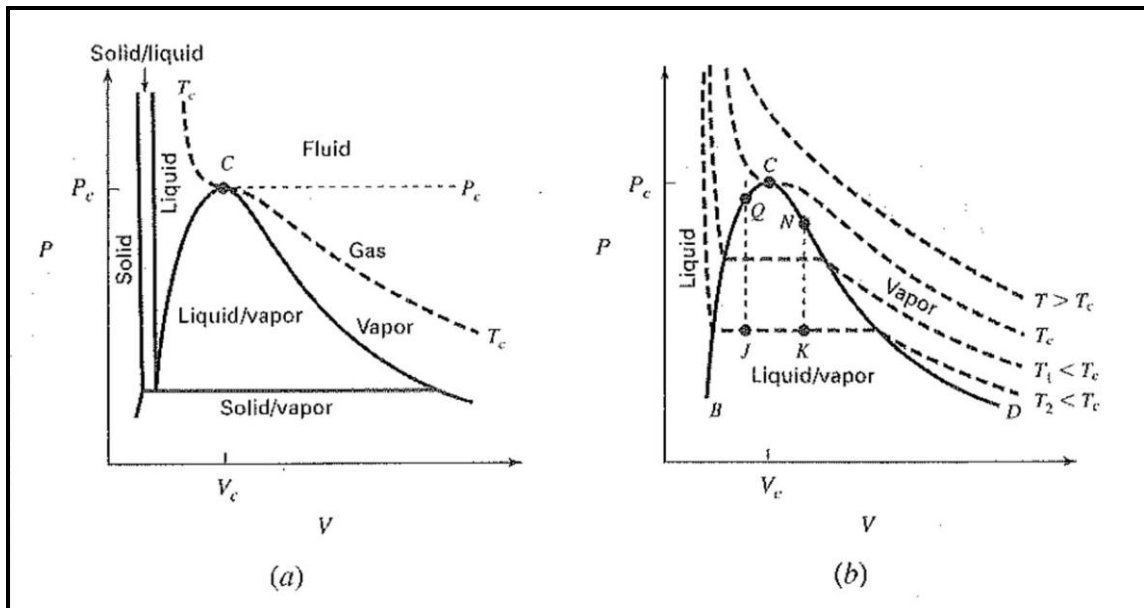
ทั้งนี้ถ้าระบบในสภาวะเริ่มต้นของกระบวนการมีส่วนที่เป็นของเหลวอยู่ในปริมาณมาก (ดังเช่นจุด J ในรูปที่ 1-16 b) แล้ว เมื่อให้ความร้อนกับระบบสองวัฏภาคนี้โดยจำกัดให้ปริมาตร

รวมมีค่าคงที่ ของเหลวจะขยายตัวและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความดันที่สูงขึ้นจะทำให้ สัดส่วนของไอในระบบลดลงจากการควบแน่น จนกระทั่งสารในระบบกลายเป็นของเหลว ทั้งหมด (จุด Q ในรูปที่ 1-16 b) กระบวนการเปลี่ยนแปลงตามเส้น JQ ในรูปที่ 1-16 b นี้จะ สามารถแสดงในแผนภาพ P-T ได้ตามเส้นที่บิจากจุด (J, K) ไปยัง Q ในรูปที่ 1-17 และเมื่อให้ ความร้อนแก่ของไหลในระบบต่อไป ก็จะดำเนินตามเส้นประ V'_2 ซึ่งเบี่ยงเบนออกจากเส้นการ กลายเป็นไอในลักษณะเดียวกันกับการให้ความร้อนแก่ Subcooled liquid ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

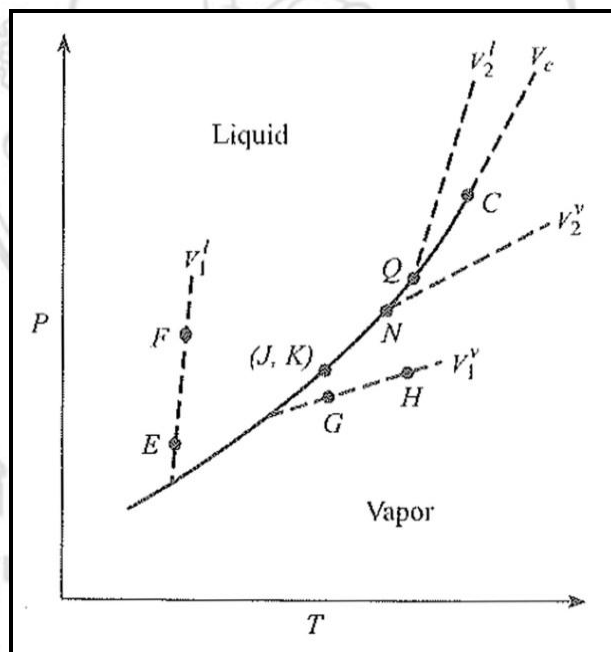
สำหรับกระบวนการให้ความร้อนแก่ระบบสองวัฏภาคที่มีของเหลวอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าใน กรณิแรก (ดังเช่นจุด K ในรูปที่ 1-16 b) การให้ความร้อนจะทำให้ของเหลวกลายเป็นไอและ ส่วนแบ่งระหว่างของเหลวกับไอก็จะค่อยๆ เคลื่อนตัวลงต่ำ จนของเหลวกลายเป็นไอหมด (จุด N) ซึ่งในรูปที่ 1-17 กระบวนการนี้แทนด้วยเส้น (J, K) ไปยัง N เมื่อให้ความร้อนต่อไปไอก็จะ กลายเป็นไอร้อนยวดยิ่งและดำเนินตามเส้นปริมาตรคงที่ V''_2

ในกรณีพิเศษที่เติมน้ำในภาชนะให้มีปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสถานะของ ระบบจากการให้ความร้อนนี้เป็นไปตามเส้นแนวตั้งที่ผ่านจุดวิกฤตในรูปที่ 1-16 b สิ่งที่เกิดขึ้น ก็คือ ความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของไอและของเหลวในระบบ แต่จะไม่ทำ ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจนเหลือเฟสเดียวในระบบ และเมื่อถึงจุดวิกฤต เส้นที่แบ่งระหว่างเฟส ไอกับเฟสของเหลว (หรือ “ผิวน้ำ” นิ่งเอง) จะเริ่มไม่ชัดเจนและหายไปในที่สุด ซึ่งในรูปที่ 1-17 กระบวนการนี้เป็นไปตามเส้นทึบ จากจุด (J, K) ไปยังจุดวิกฤต C การให้ความร้อนแก่ระบบซึ่ง อยู่ที่จะวิกฤตต่อไปจะทำให้ของไหลดำเนินตามเส้น V_c ซึ่งเป็นเส้นปริมาตรต่อโมลคงที่ โดยมี ค่าเท่ากับปริมาตรต่อโมลของไหลวิกฤต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 1-16 แผนภาพ P-V ของน้ำ



รูปที่ 1-17 แผนภาพ P-T สำหรับของไหลบริสุทธิ์ โดยแสดงเส้นความดันไอและเส้นปริมาตรคงที่
ในบริเวณของไหลสถานะเดียว

1.4.7 ปริมาณพลังงานความร้อนที่ให้กับน้ำ

แนวทางการคำนวณปริมาณพลังงานความร้อนที่ให้กับน้ำที่อุณหภูมิปกติ (25°C) เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ และมีอุณหภูมิและความดันเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในสภาวะได้จุด

วิกฤต (300 °C) จะอาศัยหลักการของกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (1st Law of Thermodynamic) ที่ว่าด้วยการอนุรักษ์พลังงาน กล่าวคือ “พลังงานไม่มีวันสูญหาย แต่จะมีการเปลี่ยนรูปจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้” นั่นคือ

$$\Delta (\text{พลังงานของระบบ}) + \Delta (\text{พลังงานของสิ่งแวดล้อม}) = 0$$

ในระบบปิดซึ่งไม่มีการถ่ายโอนสารผ่านขอบเขตของระบบจะไม่มีการเคลื่อนที่ของพลังงานภายในผ่านขอบเขตของระบบ การถ่ายโอนพลังงานผ่านขอบเขตของระบบจะเกิดขึ้นในรูปของความร้อน (Q) และงาน (W) เท่านั้น และเนื่องจากพลังงานไม่มีวันสูญหายไป พลังงานที่ถ่ายโอนเข้า/ออกระบบจึงส่งผลให้พลังงานของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมของระบบปิดมีค่าเท่ากับพลังงานสุทธิที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบในรูปของความร้อนและงาน

$$\Delta (\text{พลังงานของระบบ}) = \Delta E_{\text{sys}} = Q + W$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานสำหรับระบบปิด โดยปกติแล้วจะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในระบบเท่านั้น ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta (U') = Q + W$$

เมื่อ U' คือ พลังงานภายในรวมของระบบ

หรือถ้าเขียนในรูปอนุพันธ์ (Different form) จะได้ว่า

$$(dU') = dQ + dW$$

สำหรับระบบปิดที่ประกอบด้วยก๊าซ n โมล สามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta (nU') = n \Delta U = Q + W$$

$$d(nU') = ndU = dQ + dW$$

สำหรับการให้ความร้อนกับน้ำในปริมาตรปิด จะทำให้ระบบเกิดการขยายตัวที่ความดันคงที่ ($P=\text{constant}$) ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$dW = -P dV$$

เมื่อ	dV	คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตร
	P	คือ ความดันบรรยากาศ 101.325 kPa

ค่า P (ความดันบรรยากาศ) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความดันภายในของระบบสำหรับกระบวนการที่ผันกลับ จากสมการข้างต้นจะสามารถหาพื้นที่ระบบทำได้ เมื่อมีการขยายตัวของระบบจากปริมาตรเริ่มต้น (V_{in}) ไปสู่ปริมาตรสุดท้าย (V_{fi}) แต่ในกรณีระบบปิดแล้วจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อให้ความร้อนกับระบบดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่างานที่ระบบทำมีค่าเป็น ศูนย์ ($dW=0$) ดังนั้นเมื่อแทนค่า dW ในสมการข้างต้นจะได้ว่าค่าความร้อนจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

$$Q = \Delta U = m (u_{fi} - u_{in})$$

เมื่อ	Q	คือ ค่าพลังงานความร้อน, kJ
	m	คือ มวลของน้ำ, kg
	u_{in}	คือ พลังงานภายใน ณ สภาวะเริ่มต้น, kJ/kg
	u_{fi}	คือ พลังงานภายใน ณ สภาวะสุดท้าย, kJ/kg

ในการหาค่าพลังงานภายในของน้ำสามารถหาได้โดยใช้ตารางอุณหพลศาสตร์เปิดค่าพลังงานภายในที่อุณหภูมิและความดันตามสภาวะต่างๆ ได้ แต่ถ้าในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าพลังงานภายในโดยการเปิดตารางได้ จะสามารถหาได้จากสูตรดังนี้

$$u = h - Pv$$

เมื่อ	u	คือ ค่าพลังงานภายใน, kJ/kg
	h	คือ ค่าเอนทัลปี, kJ/kg
	P	คือ ความดัน, kPa
	v	คือ ปริมาตรจำเพาะ, m^3/kg

ในกรณีที่เรากำลังพิจารณาในสภาวะของผสมอิ่มตัว (Saturate mixture) จะมีค่าคุณภาพไอน้ำ (x) เข้ามาเกี่ยวข้องในการหาค่าพลังงานภายในที่สภาวะนั้นๆ ซึ่งสามารถหาได้จากสูตรดังนี้

$$M_{Total} = m_{Vapor} + m_{Liquid}$$

$$x = m_{\text{vapor}} / m_{\text{Total}}$$

จะได้สมการในการหาค่าพลังงานภายในดังนี้

$$u_{@x} = u_f + x (u_{fg})$$

เมื่อ $u_{@x}$ คือ ค่าพลังงานภายในที่มีค่าคุณภาพไอน้ำในสภาวะนั้นเท่ากับ x ,
kJ/kg
 x คือ ค่าคุณภาพไอน้ำ

ในการหาค่า เอนทาลปีหรือพลังงานภายในนั้นสามารถหาค่าได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ หรือจากกราฟ P-h Diagram ของน้ำได้

1.4.8 ปริมาณพลังงานความร้อนที่ให้กับภาชนะรับความดัน

การคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนให้กับภาชนะรับความดันที่ทำจากสแตนเลส สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q = m c_p (T_{fi} - T_{in})$$

เมื่อ m คือ มวลของวัตถุ, kg
 c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสแตนเลส, J/kg K
 T_{in} คือ อุณหภูมิสแตนเลส ณ สภาวะเริ่มต้น, K
 T_{fi} คือ อุณหภูมิสแตนเลส ณ สภาวะสุดท้าย, K

ในการคำนวณจะกำหนดให้อุณหภูมิสุดท้ายของสแตนเลส มีค่าเท่ากับอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำภายในถังสแตนเลส และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของสแตนเลสมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำซึ่งมีค่า 25 °C

1.4.9 การสูญเสียความร้อน

การสูญเสียความร้อนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการทางความร้อนที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ทั้งนี้การสูญเสียความร้อนจะอาศัยหลักการเหมือนกันเดียวกับ หลักการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [51] ที่เป็นการศึกษาถึงอัตราการถ่ายเทพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบต่างๆ โดยอาจเกิดขึ้นระหว่างระบบสองระบบหรือระหว่างระบบหนึ่ง กับสิ่งแวดล้อม ที่

มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิและไม่มีการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ และส่งผลทำให้พลังงานในรูปแบบของความร้อนจะถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า หรือกล่าวได้ว่าเกิดความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ขึ้นในระบบ ทั้งนี้จะสามารถหาได้จากค่าการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) ดังนั้นเมื่อเราทราบการกระจายของอุณหภูมิก็นสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ได้ โดยอาศัยสมการการสูญเสียความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction) และการพาความร้อน (Convection) ร่วมกับการสูญเสียความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การสูญเสียความร้อนแบบการนำความร้อน

การนำความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในของเหลว และของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง ในก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะท้อนระหว่างโมเลกุลหรือกล่าวคือการนำ ความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับแก้วน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทจากแก้วน้ำร้อนนั้นไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (k)

ดังเช่นการพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก กรณีนี้แสดงให้เห็นว่ามีการถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำนั้นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิ และเมื่อแทนด้วยสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ จะได้สมการดังนี้

$$Q_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

เมื่อ Q_{cond} คือ การสูญเสียความร้อนแบบการนำความร้อน, W

$\frac{\partial T}{\partial x}$	คือ ค่าอนุพันธ์ในทิศทางที่ความร้อนไหล
k	คือ สภาพการนำความร้อนของวัสดุ, W/m °C
A	คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุ, m ²

2) การสูญเสียความร้อนแบบการพาความร้อน

การพาความร้อนคือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_{conv} = h_{conv} A (T_{surface} - T_{\infty})$$

เมื่อ Q_{conv}	คือ การสูญเสียความร้อนแบบการพาความร้อน, W
h_{conv}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m ² K
A	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ, m ²
$T_{surface}$	คือ อุณหภูมิผิวน้ำ, K
T_{∞}	คือ อุณหภูมิอากาศที่ผ่าน, K

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่นิ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ติดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้น ของไหลที่อยู่ต่ำกว่า ก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ขึ้น อยู่กับปริมาณต่างๆ หลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสาร ซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสารก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย ถ้าจะหาสมการมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่ยาก

มาก และทำได้ในกรณีง่ายๆ บางกรณีเท่านั้น สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ

สำหรับการพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ของทรงกระบอกที่ถูกวางตั้งอยู่ในแนวตั้ง สามารถพิจารณาได้จากทฤษฎีของเซเบซี (Cebeci) [52] มิน โควิกซ์ (Minkowycz) [53] และ สแปร์โรว์ (Sparrow) [55] ที่ได้ดำเนินการศึกษาวิจัยหลักการพาความร้อนในทรงกระบอก พร้อมทั้งได้นำเสนอการพิจารณาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยผ่านทางสมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{Surface} - T_{Surround})L^3}{\alpha\nu}$$

เมื่อ	Ra_L	คือ Rayleigh number
	g	คือ Gravitational acceleration, m/s^2
	β	คือ Thermal Expansion Coefficient, $1/K$
	L	คือ ความยาวของวัสดุ, m
	α	คือ การแพร่กระจายทางความร้อน (Thermal diffusivity), m^2/s
	ν	คือ ค่าความหนืดไคเนติก (Kinematic viscosity), m^2/s
	$T_{Surface}$	คือ อุณหภูมิผิวน้ำ, K
	$T_{Surround}$	คือ อุณหภูมิอากาศที่ผ่าน, K

$$\overline{Nu}_{m,plate}^{\frac{1}{2}} = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{[1 + (\frac{0.492}{Pr})^{\frac{9}{16}}]^{\frac{8}{27}}}$$

$$\xi = \frac{(\frac{L}{D})}{Ra_L^{\frac{1}{4}}}$$

$$\overline{Nu}_{m,cyl} = \overline{Nu}_{m,plate} + [1 + (1.3 \xi^{0.9})]$$

$$h_{cyl} = \overline{Nu}_{m,cyl} \frac{k}{L}$$

เมื่อ	h_{cyl}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ของทรงกระบอกที่ถูกวางตั้งอยู่ในแนวตั้ง, $W/m^2 K$
-------	-----------	--

k	คือ สภาพการนำความร้อนของอากาศ, $W/m\ ^\circ C$
ζ	คือ ตัวแปรไร้มิติ
Pr	คือ Prandtl's Number

3) การสูญเสียความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนตรงที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงานผ่านไปยังที่ว่างโดยอาศัยการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับ คลื่นแสง รังสีความร้อนจะอยู่ในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า คล้ายกับรังสีเอกซ์เรย์ คลื่นแสง หรือรังสีแกมมา เป็นต้น แต่ต่างกันตรงที่ความยาวคลื่น รังสีความร้อนเดินทางเป็นเส้นตรง สามารถส่งผ่านไปในที่ว่าง (Space) และสูญญากาศ ตัวอย่างของการแผ่รังสี ได้แก่ การส่งผ่านความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังผิวโลก หรือการปรุงอาหารโดยผ่านอาหารภายใต้ขดลวดไฟฟ้า เป็นต้น รังสีความร้อนเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนที่มีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมากๆ อาทิเช่น ในเตาเผาเซรามิก (Ceramic Furnace) เตาเผาในหม้อไอน้ำ (Boiler Furnace) เป็นต้น ทั้งนี้การแผ่รังสีส่วนใหญ่จะเกิดร่วมกับการนำ และการพาความร้อน

แนวคิดเกี่ยวกับกลไกการแผ่รังสีความร้อน คือ พลังงานความร้อนของแหล่งกำเนิดความร้อน เช่น ผนังของเตาเผา จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานของคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นดังกล่าวจะเดินทางผ่านไปภายในช่องว่างเป็นเส้นตรง และจะกระทบกับวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งวัตถุดังกล่าวก็จะดูดซับคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า และเปลี่ยนกลับไปเป็นพลังงานความร้อน แต่อย่างไรก็ตามวัตถุดังกล่าวไม่สามารถที่จะดูดซับคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้รังสีบางส่วนจะสะท้อนกลับไปที่ว่าง

ดังนั้นจึงมีการนิยามวัตถุดำ (Black body) ว่าเป็นวัตถุที่ดูดซับพลังงานรังสีทั้งหมดและไม่มีการสะท้อนออกมาเลย และวัตถุดำนี้ยังสามารถปลดปล่อยรังสีโดยไม่มีการสะท้อนออกมาเลย โดยค่าความสามารถในการปลดปล่อย (Emissivity, ϵ) หรือ ค่าอัตราส่วนของกำลังการปลดปล่อย (Emissive power) ของผิวหน้าวัตถุใดๆ ต่อผิวหน้าของวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน จึงมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับวัตถุดำ ซึ่งถือว่าเป็นตัวแผ่รังสีที่สมบูรณ์แบบที่สุด

ในปี 1884 สตีเฟน และ โบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ได้นำเสนอสมการในการคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุด โดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ไว้ดังนี้

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_{Black\ body}^4 - T_{Surface}^4)$$

เมื่อ Q_{rad}	คือ การสูญเสียความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน, W
ϵ	คือ ค่าความสามารถในการปลดปล่อย (Emissivity) สำหรับวัตถุใดๆ ที่ไม่ใช่วัตถุดำ ($\epsilon < 1$)
σ	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
A	คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ, m^2
$T_{Black\ body}$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุดำ, K
$T_{Surface}$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิววัตถุ, K

4) การสูญเสียความร้อนรวมทั้งระบบ

จากการหาค่าการสูญเสียความร้อนแบบการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อนข้างต้น ซึ่งจะมีการพิจารณาคำนวณค่าในรูปแบบของสมการที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจะสามารถหาค่าการสูญเสียความร้อนรวมทั้งระบบได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{Total} = Q_{Conduction} + Q_{Convection} + Q_{Radiation}$$

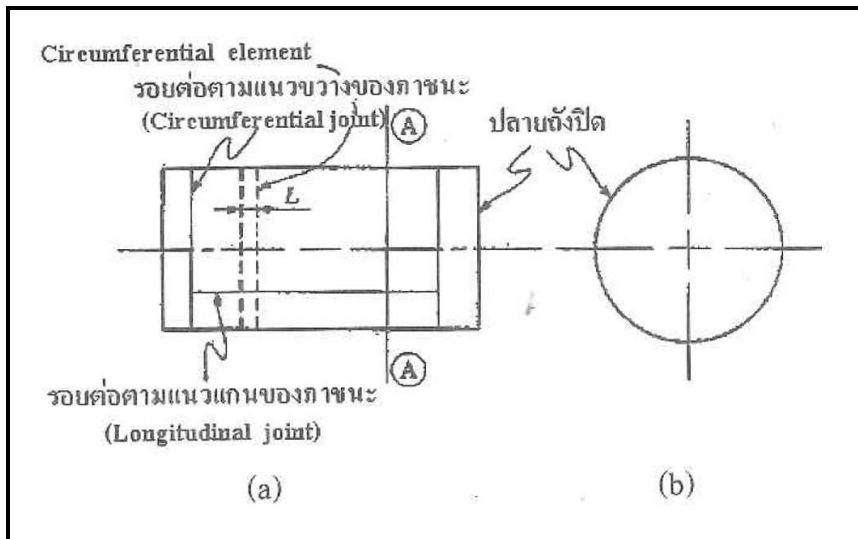
เมื่อ Q_{Total}	คือ การสูญเสียความร้อนรวมทั้งระบบ, W
$Q_{Conduction}$	คือ การสูญเสียความร้อนแบบการนำความร้อน, W
$Q_{Convection}$	คือ การสูญเสียความร้อนแบบการพาความร้อน, W
$Q_{Radiation}$	คือ การสูญเสียความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน, W

1.4.10 การออกแบบภาชนะรับความดัน

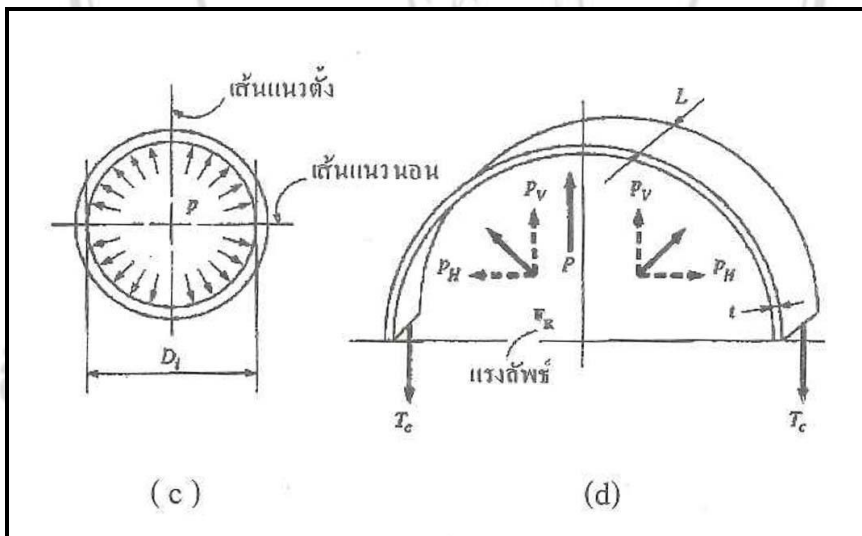
ภาชนะรับความดัน มีวัตถุประสงค์ในการสร้างเพื่อบรรจุของเหลวหรือก๊าซภายใต้ความดัน ในทางปฏิบัติภาชนะความดันประกอบด้วยเปลือก หรือผนังเพื่อบรรจุความดันด้วย Flange Rings และถูกยึดด้วยรอยต่อและทนต่อแรงดันสูง

1) ความเค้นในภาชนะความดันผนังบาง

พิจารณาจากรูปตัดของภาชนะความดันผนังบาง จากรูป



รูปที่ 1-18 รูปตัดของภาชนะความดันผนังบาง



รูปที่ 1-19 หน้าตัด (Cross Section) ของภาชนะความดันผนังบาง

จากรูปที่ 1-18 ภาชนะความดันมีความยาว L มีความหนา t ฉะนั้น แรงลัพธ์ในแนวตั้ง (Vertical) $F_R = PLD_i$ (หาจาก $F = PA$) ในที่นี้ค่าของ A เป็น *Projected Area* $= LD_i$ การต้านของแรงนี้ถูกกระทำตอบโต้โดยผนังของภาชนะความดัน การต้านเป็นการต้านแรงดึงโดยแรง T_c ซึ่งดูได้จากไดอะแกรมรูปอิสระ (Free-Body Diagram) ผลรวมของแรงในแนวตั้ง $F_R = 2T_c$ ฉะนั้น $T_c = P/2$ ดังนั้น การแก้ปัญหสำหรับความเค้นแรงดึงในแนว

เส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Hoop Stress ในผนังของภาชนะความดัน จะได้ดังนี้

$$\sigma_{tc} = \frac{T_c}{tL} = \frac{F_R / 2}{tL} = \frac{PLD_i}{2tL} = \frac{PD_i}{2t} = \frac{P(2r_i)}{2t}$$

$$\sigma_{tc} = \frac{Pr_i}{t}$$

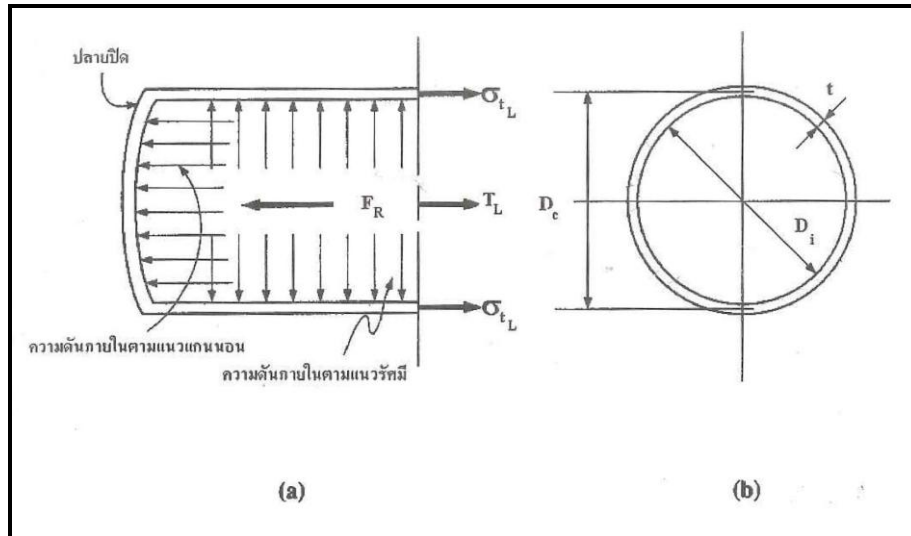
เมื่อ σ_{tc}	คือ ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ในผนังของภาชนะความดันผนังบาง
P	คือ ความดันภายใน, MPa
D_i	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของภาชนะความดัน, m
r_i	คือ รัศมีภายในของภาชนะความดัน, m
t	คือ ความหนาของภาชนะความดัน, m

ข้อสังเกต ตัวอักษร F_R หมายถึง แรงลัพธ์ (Resultant Force) ซึ่งเกิดจากความดันในถัง

ในสมการ $\sigma_{tc} = Pr_i$ สามารถใช้ในการออกแบบ เพื่อคำนวณหาความหนาของผนังภาชนะที่สามารถต้านความดันภายใน ขณะความเค้นแรงดึงอนุญาตไม่เกินที่กำหนด ($\sigma_{tc, allow}$) สมการนี้จะได้อ่า t ดังนี้

$$t = \frac{PD_i}{2(\sigma_{tc})_{allow}}$$

สภาพการณ์ของภาชนะความดันที่มีรูปทรงกระบอกปลายปิด จะฉีกหรือแยกออกตามแนวยาว (Longitudinal) ของรอยต่อ ความดันจะมีแนวโน้มเกิดขึ้นพร้อมกัน เพื่อที่จะผลักดันปลายให้แยกออกและดึงส่วนของภาชนะตามแนวเส้นรอบวง ความเค้นจะเกิดขึ้นในผนังของภาชนะความดันที่ซึ่งกระทำบนรอยต่อของจุดแนวเส้นรอบวง ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้เราเรียกว่า ความเค้นตามแนวยาวของภาชนะหรือ Longitudinal Stress ความเค้นนี้จะตั้งฉากกับความเค้นในแนวเส้นรอบวง เพื่อที่จะหาความเค้นตามแนวยาวที่เกิดขึ้นพิจารณาจากรูปส่วนปิดของภาชนะความดันรูปทรงกระบอกที่ถูกกระทำด้วยความดันดังรูปที่ 1-20



รูปที่ 1-20 ส่วนปิดของภาชนะความดันรูปทรงกระบอกที่ถูกกระทำด้วยความดัน

เนื่องจากด้านปลายของภาชนะความดันถูกปิด ผลรวมของแรงลัพธ์ (\$F_R\$) จะผลักด้านปลายของภาชนะความดันออก และสามารถหาแรงลัพธ์ในเทอมของความดันและพื้นที่ได้ดังนี้

เพื่อที่จะหาสภาพการณ์ที่สมดุลของแรง \$F_R\$ ต้องหาจากผลรวมของแรงต้าน \$T_L\$ ที่เกิดขึ้นที่ผนังในแนวแกนขนาน กำหนด \$\sigma_{tL}\$ เป็น Longitudinal Stress และกำหนดผนังของภาชนะมีความหนาเท่ากันตลอด จะได้ค่า

$$\sigma_{tL} = \frac{T_L}{A} = \frac{T_L}{\pi D_c t} = \frac{F_R}{\pi D_c t} \quad : \text{ในที่นี้ } (T_L = F_R)$$

กำหนด \$D_c\$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของภาชนะความดันระหว่างจุดศูนย์กลางของผนัง และในภาชนะผนังบางนี้ ค่าของ \$D_c = D_i\$ จะได้ค่า

$$\sigma_{tL} = \frac{P (\pi D_i^2)/4}{\pi D_i t} = \frac{P D_i}{4t}$$

$$\sigma_{tL} = \frac{P D_i}{4t} = \frac{P r_i}{2t}$$

ซึ่ง \$\sigma_{tL}\$ เป็นความเค้นตามแนวแกนขนานในผนังของภาชนะความดัน จะพบว่าความเค้นตามแนวแกนขนานของภาชนะความดัน จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเค้นตามแนวเส้น

รอบวง หรือ $\sigma_{tc} = 2\sigma_{tL}$ จะขึ้นกับอัตราส่วนของไฮโดรคาร์บอนในสถานะความดันปิด และเกิดความเค้นมากเกินไป “สถานะความดันจะแตกหรือแยกออกตามแนวแกนยาวของภาชนะ”

1.4.11 ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้

1) ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ [12] [18]

สำหรับข้อมูลปริมาณของผลิตภัณฑ์ (ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ) ที่เกิดขึ้นในการทดลอง ณ เงื่อนไขต่างๆ จะนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น โดยใช้สมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{Liquid fuel (wt.\%)} = W_{\text{Liquid fuel}} / W_{\text{feed}} \times 100\%$$

$$\text{Solid fuel (wt.\%)} = W_{\text{Solid fuel}} / W_{\text{feed}} \times 100\%$$

$$\text{Gas (wt.\%)} + \text{Organics soluble (wt.\%)} = 1 - (\text{Liquid fuel} + \text{Solid fuel}) \text{ (wt.\%)}$$

เมื่อ $W_{\text{Liquid fuel}}$ คือ ปริมาณเชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ, g
 $W_{\text{Solid fuel}}$ คือ ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ, g
 W_{feed} คือ ปริมาณน้ำและวัตถุดิบตั้งต้น, g

1.4.12 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

1) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [12]

ค่าความร้อน (Heating Value) เป็นค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg kcal/kg Btu/lb หรือ kcal/liter เป็นต้น และมีคำจำกัดความคือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทหรือคายออกจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เกิดอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ (ก๊าซไอเสีย) เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นที่สภาวะมาตรฐานของเชื้อเพลิงและอากาศที่เผาไหม้ ซึ่งคำว่าสภาวะมาตรฐานในที่นี้คือ ความดันสัมบูรณ์ 1 บรรยากาศ (atm) และอุณหภูมิ 25 °C (77 °F) โดยปกติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะถูกกำหนดขึ้นจากการทดลองเผาเชื้อเพลิงในอุปกรณ์ที่เรียกว่า บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM D 2015 ซึ่งจะกำหนดค่าความร้อนไว้ 2 ค่าคือ

1.1) Gross Calorific Value (High Heating Value-HHV) หมายถึง ค่าความร้อนที่ได้ทั้งหมดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยปกติแล้วในเชื้อเพลิง จะมีน้ำปนอยู่ด้วย และเมื่อเผาไหม้ น้ำส่วนนี้จะรวมกับ น้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งจะมีความร้อนส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในรูปความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ความร้อนแฝงส่วนนี้ ไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ สำหรับค่า Gross Calorific Value นี้ไม่ได้หักค่าความร้อนแฝงส่วนนี้ออก

1.2) Net Calorific Value (Low Heating Value-LHV) หมายถึง ค่าความร้อนที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ ซึ่งไม่รวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำที่อยู่ในตัวอย่าง ค่าความร้อนของตัวอย่างจะมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณจีเถ้า ตัวอย่างที่มีค่าความร้อนต่ำ จะมีปริมาณจีเถ้าสูง

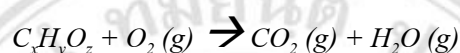
ทั้งนี้ค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่นำเอาค่าความร้อนแฝง (Latent heat) ของไอน้ำที่ปะปนอยู่ในก๊าซไอเสียมารวมด้วย ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำจะไม่นำค่าดังกล่าวมารวมเพราะสมมติฐานที่ว่าในกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้นปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นในก๊าซไอเสียจะไม่เกิดการควบแน่นและไม่คายพลังงานความร้อนแฝงออกมาให้ระบบ (อุณหภูมิก๊าซไอเสียจะมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำในก๊าซไอเสียเสมอ) แต่จะถูกทิ้งไปสู่บรรยากาศทางปล่องไอเสียแทน นั่นคือปริมาณความร้อนในส่วนนี้จะเป็ความร้อนที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เลยในกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึงนิยมนำค่าความร้อนต่ำมาเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องจักรอุปกรณ์มากกว่าค่าความร้อนสูง เนื่องจากให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและสะท้อนความเป็นจริงมากกว่าในแง่ของประสิทธิภาพเชิงความร้อน

2) บอมบ์แคลอริมิเตอร์

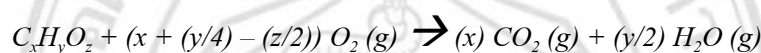
การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ จะอาศัยหลักการของ “Calorimetry” ซึ่งเป็นหลักการทางวิทยาศาสตร์ในการวัดค่าความร้อน (q) ที่ถูกปลดปล่อยหรือดูดซับโดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือฟิสิกส์ ถ้าหากกระบวนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นในสภาวะที่ปริมาตรคงที่ (Constant Volume Conditions) ค่าความร้อนที่วัดได้ (q_v) จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (ΔU)

ด้วย และในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ปริมาตรจะถูกจำกัดให้มีค่าคงที่ตลอดการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ในปี พ.ศ. 2424 (ค.ศ. 1881) Berthelot ได้ออกแบบอุปกรณ์ปิดที่เรียกว่า Bomb โดยอาศัยความจริงที่ว่าสารหลายๆ ตัวรวมทั้งสารไฮโดรคาร์บอนอันมีธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้โดยง่าย และปฏิกิริยาทั่วไปของการเผาไหม้สารไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจนแสดงได้ดังสมการด้านล่าง ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักก็คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ



สมการสมดุลสำหรับปฏิกิริยาแสดงได้คือ



บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ทำงานได้โดยการเผาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ความดันออกซิเจนสูงภายในภาชนะสเตนเลสที่ปริมาตรคงที่ ภาชนะสเตนเลสจะถูกล้อมรอบไว้ด้วยน้ำ และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซับไว้ด้วยน้ำที่ล้อมรอบอยู่ การวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำจะทำให้คำนวณหาค่าความร้อนที่วัดได้จากสถานะที่ปริมาตรคงที่ ในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์นั้น ค่าความร้อนที่วัดได้จากการเผาไหม้ตัวอย่าง (Sample) ก็คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจากสถานะเริ่มต้น (Initial state) ถึงสถานะสุดท้าย (Final state) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ของกระบวนการนี้ก็จะสัมพันธ์กับค่าพลังงานภายใน เช่นเดียวกันดังสมการที่ต่อไปนี้

$$\Delta H^0 = \Delta U + \Delta(PV)$$

$$\Delta(PV) = \Delta nRT$$

ซึ่ง Δn เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมลของก๊าซทุกชนิดในระบบปฏิกิริยา ในการคำนวณนั้น จะใช้สมการความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่าง q_v และความจุความร้อน C_v ดังสมการต่อไปนี้

$$q_v = C_v \Delta T$$

เมื่อ C_v คือค่าความจุความร้อนของตัวแคลอริมิเตอร์เอง ซึ่งค่านี้จะต้องมีการหามาก่อน โดยสารที่ทราบค่าความร้อนจากการเผาไหม้แล้ว (ΔH_c) และในที่นี้ให้นิยามว่า C_{cal} ซึ่งสมการข้างต้น จึงจะสามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่ทราบค่าของสารตัวอย่าง โดยอาศัยค่าความจุความร้อนที่ทราบค่าแล้ว ดังตัวอย่าง

2.1) ขั้นที่ 1: คำนวณหาค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ โดยสมการ

$$C_{cal} = q_{v,known} / \Delta T$$

2.2) ขั้นที่ 2: คำนวณหาค่าความจุความร้อนของสารตัวอย่าง (Sample) โดย

$$q_{v,unknown} = (C_{cal}) (\Delta T)$$

3) การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

นอกจากวิธี บอมบ์แคลอริมิเตอร์แล้ว ยังสามารถคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ โดยการใช้ค่าสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เกี่ยวข้องในสูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดูลอง (Dulong formula) สูตรของเดเมียบาส (Demirbas) ในหน่วย MJ/kg และ SEYLER's formula ในหน่วย cal/g ดังนี้

สูตรของดูลอง (Dulong formula)

$$HHV (MJ/kg) = 33.585C + 141.924S - 15.327O - 3.585O^2$$

$$HHV (MJ/kg) = 0.3383C + 1.422 (H - O/8) [12] [20]$$

สูตรของเดเมียบาส

$$HHV (MJ/kg) = 33.5C + 142.3S - 15.4O - 24.5N$$

$$HHV (MJ/kg) = 31.2FC + 15.34VM$$

SEYLER's formula (D.W. van Krevelen, 1993) [14]

$$\text{Gross calorific value: } CV (cal/g) = 123.9C + 388.1H + 0.25O^2 - 4269$$

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น และเถ้า (Ash) โดยเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีค่าความร้อนประมาณ 15-30 MJ/kg

1.4.13 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน [55]

การคำนวณหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (Energy Recovery) จะสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง และ ก๊าซ เป็นต้น เทียบกับพลังงานตั้งต้นของวัตถุดิบที่ใช้ ดังแสดงสมการต่อไปนี้

$$\text{Energy recovery (\%)} = (\text{Energy of obtained liquid fuel} / \text{Energy of raw material}) \times 100$$

เมื่อ Energy recovery	คือ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน
$\text{Energy of obtained liquid fuel}$	คือ พลังงานจากเชื้อเพลิงเหลว ($W_{\text{Liquid fuel}} \times HHV_{\text{Liquid fuel}}$), MJ
$\text{Energy of raw material}$	คือ พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น ($W_{\text{CNS}} \times HHV_{\text{CNS}}$), MJ

1.4.14 ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการ จะมีการใช้พลังงานอยู่ 2 ส่วนหลัก ซึ่งก็คือ 1. พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น และ 2. พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์ความดันสูง จากนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ซึ่งก็คือ 1. เชื้อเพลิงเหลว และ 2. เชื้อเพลิงแข็ง ทั้งนี้ จะสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงพลังงานได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน} = (E_{\text{Liquid fuel}} + E_{\text{Solid fuel}}) / (E_{\text{CNS}} + E)$$

เมื่อ $E_{\text{Liquid fuel}}$	คือ พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหลว ($W_{\text{Liquid fuel}} \times HHV_{\text{Liquid fuel}}$), MJ
$E_{\text{Solid fuel}}$	คือ พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงแข็ง ($W_{\text{Solid fuel}} \times HHV_{\text{Solid fuel}}$), MJ
E_{CNS}	คือ พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น ($W_{\text{CNS}} \times HHV_{\text{CNS}}$), MJ
E	คือ พลังงานที่ใช้เพื่อเพิ่มและรักษาอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์ความดันสูง, MJ

1.4.15 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

1) การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณ ตามมาตรฐาน ASTM D3172 จะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารที่ระเหยได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ซึ่งในการทดสอบตาม มาตรฐานดังกล่าว เชื้อเพลิงแข็งจะถูกบดเป็นผงแล้วนำไปอบให้แห้งในเตาอบภายใต้ อุณหภูมิประมาณ 105-110 °C จนได้น้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปเมื่อเทียบกับ น้ำหนักเดิม คือ ปริมาณความชื้น จากนั้นเชื้อเพลิงที่แห้งแล้วจะถูกทำให้ร้อนในภาชนะ ปิด (เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน) ภายใต้อุณหภูมิ 900 °C เพื่อไล่สารระเหยที่เผาไหม้ ได้ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ น้ำหนักที่หายไป คือ ปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้นั่นเอง จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ได้ไปอบในภาชนะเปิดภายใต้อุณหภูมิ 750 °C เพื่อให้เกิดการเผา ไหม้จนได้น้ำหนักที่เหลือคงที่ และเป็นน้ำหนักของเถ้า ในขณะที่น้ำหนักส่วนที่หายไป คือ ปริมาณของคาร์บอนคงตัวนั่นเอง

1.1) ความชื้น (Moisture) เป็นค่าอัตราส่วนน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวล เชื้อเพลิงทั้งหมด ส่วนใหญ่ความชื้นมักจะเป็นน้ำที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง โดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้นจะแสดงออกมาเป็นสัดส่วนน้ำหนักของ ความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือรวมทั้งหมด

1.2) สารระเหย (Volatile Matter: VM) เป็นร้อยละของน้ำหนักของตัวอย่างที่ สูญเสียไปหลังจากหักค่าความชื้นของตัวอย่างออกไป ปริมาณสารระเหย ในเชื้อเพลิง คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่พร้อมจะระเหย ติดไฟ และเผาไหม้ ความชื้นในเชื้อเพลิง เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องพิจารณา เพราะ เป็นอุปสรรคต่อการเผาไหม้ และมีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ (Burning Characteristics) อย่างมาก การที่รู้ว่า มีปริมาณความชื้นมากน้อยเพียงใดใน เชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้ จะช่วยให้สามารถคาดการณ์ล่วงหน้า ถึงปัญหาที่ อาจเกิดขึ้นในการเผาไหม้ และก็จะสามารถดำเนินการแก้ไขปัญหานั้น ได้

- 1.3) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon: FC) เป็นปริมาณของธาตุคาร์บอนที่มีอยู่ในตัวอย่าง หรือเป็นส่วนที่หลงเหลืออยู่ในตัวอย่างก่อนที่จะนำไปเผาไหม้ ซึ่งมีแนวทางในการประมาณค่าดังรูปแบบการคำนวณต่อไปนี้

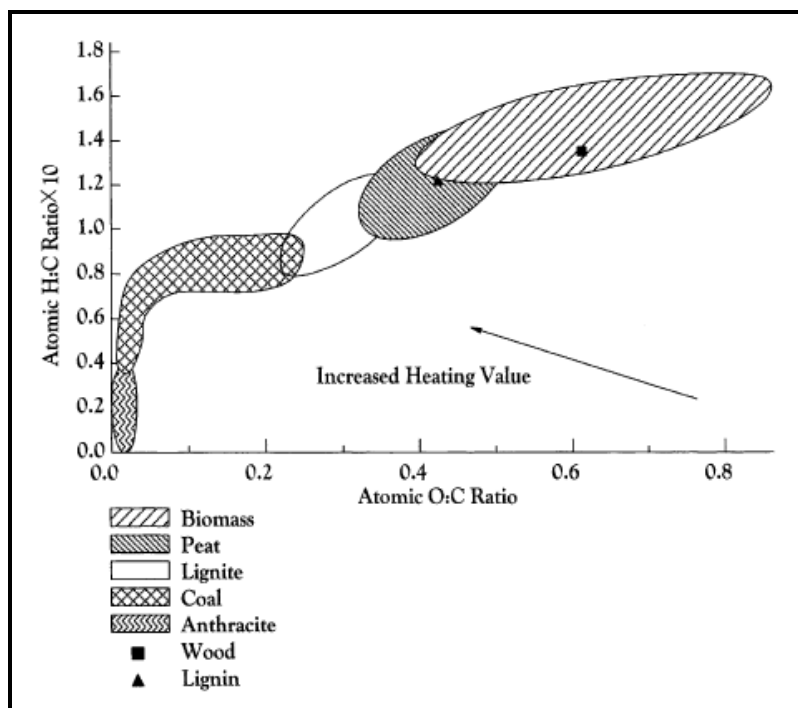
$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{เถ้า} + \% \text{สารระเหย}) [8]$$

- 1.4) เถ้า (Ash) เป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ หรือเป็นส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ โดยเถ้าเกิดจากสารแร่ธาตุ ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้ ในความเป็นจริง อาจจะมีคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้บางส่วนที่เรียกว่า ชาร์ ปนอยู่ด้วย

2) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น โดยระบุในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ถูกกำหนด โดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอ แล้ววัดองค์ประกอบของไอเสีย เพื่อคำนวณย้อนกลับ ้ไปหาปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจนและกำมะถันจะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีการทางเคมี ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ กำมะถัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 1-21 แผนภาพ Van Kervelen แสดงอัตราส่วนระหว่าง O:C กับ H:C สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง [7]

จากรูปที่ 1-21 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง O:C กับ H:C ของไม้มีค่าประมาณ 0.6 กับ 1.3 ส่วนของถ่านหินลิกไนต์มีค่าประมาณ 0.4 กับ 1.2 ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าไม้มีค่า O:C กับ H:C ที่มากกว่าถ่านหินลิกไนต์ จึงทำให้ค่าความร้อนของไม้มีค่าน้อยกว่าถ่านหินลิกไนต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่า O:C กับ H:C มีค่าแปรผกผันกับค่าความร้อน กล่าวคือ เมื่อ O:C กับ H:C มีค่าที่ลดน้อยลงจะทำให้เชื้อเพลิงแข็งมีค่าความร้อนที่สูงมากขึ้น [56]

1.5 ขอบเขต และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ในการทดลองจะผ่านกระบวนการแกะเมล็ดที่อยู่ภายในออก ผ่านการบด และคัดแยก ให้มีขนาดไม่เกิน 1.0 x 1.0 เซนติเมตร ผ่านกระบวนการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C ให้มีความชื้นน้อยกว่า 5% มาตรฐานแห้ง หลังจากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ

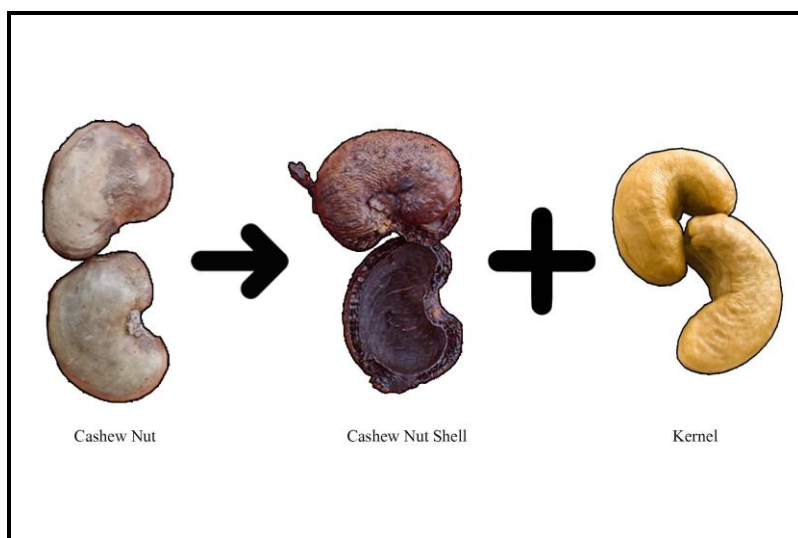
- 2) ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลผลิตตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่มีปริมาณของแข็งผสมอยู่ในของเหลวประมาณร้อยละ 10 ทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C (3 อุณหภูมิ) ความดัน 1.5 MPa ถึง 8.5 MPa และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาหลังจากที่อุณหภูมิถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา 60 120 และ 180 นาที (4 เวลา)
- 3) ดำเนินการทดลองผลิตตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ใน 2 รูปแบบคือ 1. แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต 5 wt.% และ 2. แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 4) ตั้งปฏิกรณ์ ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาตรความจุภายในขนาดไม่น้อยกว่า 500 มิลลิลิตร สามารถทนรับความดันจากไอน้ำได้สูงสุด 8.5 MPa และมีอุณหภูมิในช่วงการทำปฏิกิริยา 200 °C ถึง 300 °C
- 5) ทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในสถานะเงื่อนไขต่างๆ คือ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง เบื้องต้น ดังต่อไปนี้ 1. ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ 2. ค่าความร้อนสูง และ 3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง
- 6) วิเคราะห์สมดุลมวล และประสิทธิภาพพลังงานของระบบฯ
- 7) วิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว ณ สภาวะเงื่อนไขการทดลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิงในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ

1.5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ดำเนินการค้นคว้าข้อมูล ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล รวมไปถึงข้อมูลการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ
- 2) จัดเตรียมชุดอุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด เช่น ระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า เครื่องชั่งน้ำหนัก สารเคมี เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความดัน ฯลฯ
- 3) ดำเนินการออกแบบการทดลอง ในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้มีลำดับขั้นตอนการทดลองที่เป็นระเบียบแบบแผน

- 4) จัดเตรียมเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อใช้ในการทดลองดังรายละเอียดต่อไป

- 4.1) นำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีเมล็ดอยู่ภายใน ไปผ่านกระบวนการแกะเมล็ด ออกเพื่อนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปผ่านกระบวนการขั้นต่อไป



รูปที่ 1-22 กระบวนการแยกเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

- 4.2) นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่านกระบวนการบด และคัดแยก ให้มีขนาดไม่เกิน 1.0 x 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 1-23 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการบดย่อย และการอบแห้ง

- 4.3) อบอุ่นความชื้นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่อุณหภูมิ 105 °C ให้มีความชื้นน้อยกว่า 5% มาตรฐานแห้ง
- 4.4) วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ทั้ง 2 รูปแบบ คือ แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ
- 5) ดำเนินการทดลองผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ตามรายละเอียดเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้
 - 5.1) จัดเตรียมเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (กรัม) และน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (มิลลิลิตร) ในอัตราส่วน 1 : 10 (20 กรัม ต่อ 200 มิลลิลิตร) จากนั้นใส่ลงไปบรรจุภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง พร้อมทั้งขันน็อตทั้ง 8 ตัว เพื่อยึดฝาปิดกับตัวถังปฏิกรณ์ความดันสูงให้แน่นหนา โดยใช้ประแจปอนด์ (Torque Wrench) เริ่มขันน็อตในตำแหน่งตรงกันข้ามกันเป็นรูปดาว จนถึงแรงบิดที่ประมาณ 40 ft-lb จากนั้นขันน็อตแต่ละตัวในทิศทางตามเข็มนาฬิกาตามลำดับอีกครั้งหนึ่ง เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยก่อนเริ่มการทดลอง



รูปที่ 1-24 น้ำกลั่นบริสุทธิ์ และเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่พร้อมสำหรับการทดลอง

- 5.2) ติดตั้งถังปฏิกรณ์ความดันสูงไว้ภายในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า จากนั้นติดตั้งท่อก๊าซไนโตรเจน ปิดวาล์วทั้ง 2 ด้าน และเปิดถังก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 2.5 kg/cm² เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนไล่อากาศที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ความดัน

สูงออกให้หมด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงปิดวาล์วทั้งหมด (ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงจะมีความดันเริ่มต้นประมาณ 2.5 kg/cm^2 ที่มาจากความดันของก๊าซไนโตรเจน)

- 5.3) ดำเนินการทดลองผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (จำนวนการทดลองทั้งหมด 144 ตัวอย่าง) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ

5.3.1) ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง

5.3.2) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (5 wt.%)

5.3.3) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 250 และ 300 °C (3 อุณหภูมิ)

5.3.4) ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาหลังจากที่อุณหภูมิถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้ 4 เวลา คือ ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา 60 120 และ 180 นาที

- 5.4) ภายหลังจากดำเนินการทดลองเสร็จแล้ว จะทิ้งให้ถังปฏิกรณ์ความดันสูงลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆ เปิดวาล์วเพื่อปล่อยก๊าซไนโตรเจน และก๊าซอื่นๆ ที่เกิดขึ้นออกสู่บรรยากาศ² เพื่อลดความดันภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง เมื่อลดความดันเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงคลายน็อตแต่ละตัวออกจนหมด จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (ถ่านชีวภาพ หรือ CNSC + เชื้อเพลิงเหลว) และของเหลว (น้ำเสีย) ที่เกิดขึ้นออกมาจากถังปฏิกรณ์ความดันสูง เพื่อนำไปผ่านกระบวนการคัดแยกต่อไป

- 5.5) ดำเนินการคัดแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และของเหลว ออกจากกันด้วยกระบวนการกรองครั้งที่ 1 จากนั้นนำผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทผ่านกระบวนการต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.5.1) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

² หมายเหตุ : สำหรับก๊าซที่เกิดขึ้นในบางเงื่อนไขการทดลองจะถูกเก็บตัวอย่างก๊าซด้วยถุงเก็บเก็บก๊าซเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ผลต่อไป

- 1) ล้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งด้วยอะซิโตน
- 2) แยกผลิตภัณฑ์ที่เป็น CNSC และของเหลว (อะซิโตน + เชื้อเพลิงเหลว) ด้วยกระบวนการกรองครั้งที่ 2
- 3) ผลิตภัณฑ์ที่เป็น CNSC จะนำไปผ่านกระบวนการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติขั้นพื้นฐานต่อไป
- 4) ของเหลว (อะซิโตน + เชื้อเพลิงเหลว) จะนำไปผ่านกระบวนการระเหย อะซิโตนเพื่อนำเชื้อเพลิงเหลว ไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นต่อไป

5.5.2) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (น้ำเสีย)

- 1) จัดเก็บผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (น้ำเสีย) เพื่อไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นต่อไป

5.5.3) เก็บรวบรวมข้อมูล พร้อมทั้งวิเคราะห์สมดุลมวล และประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบฯ

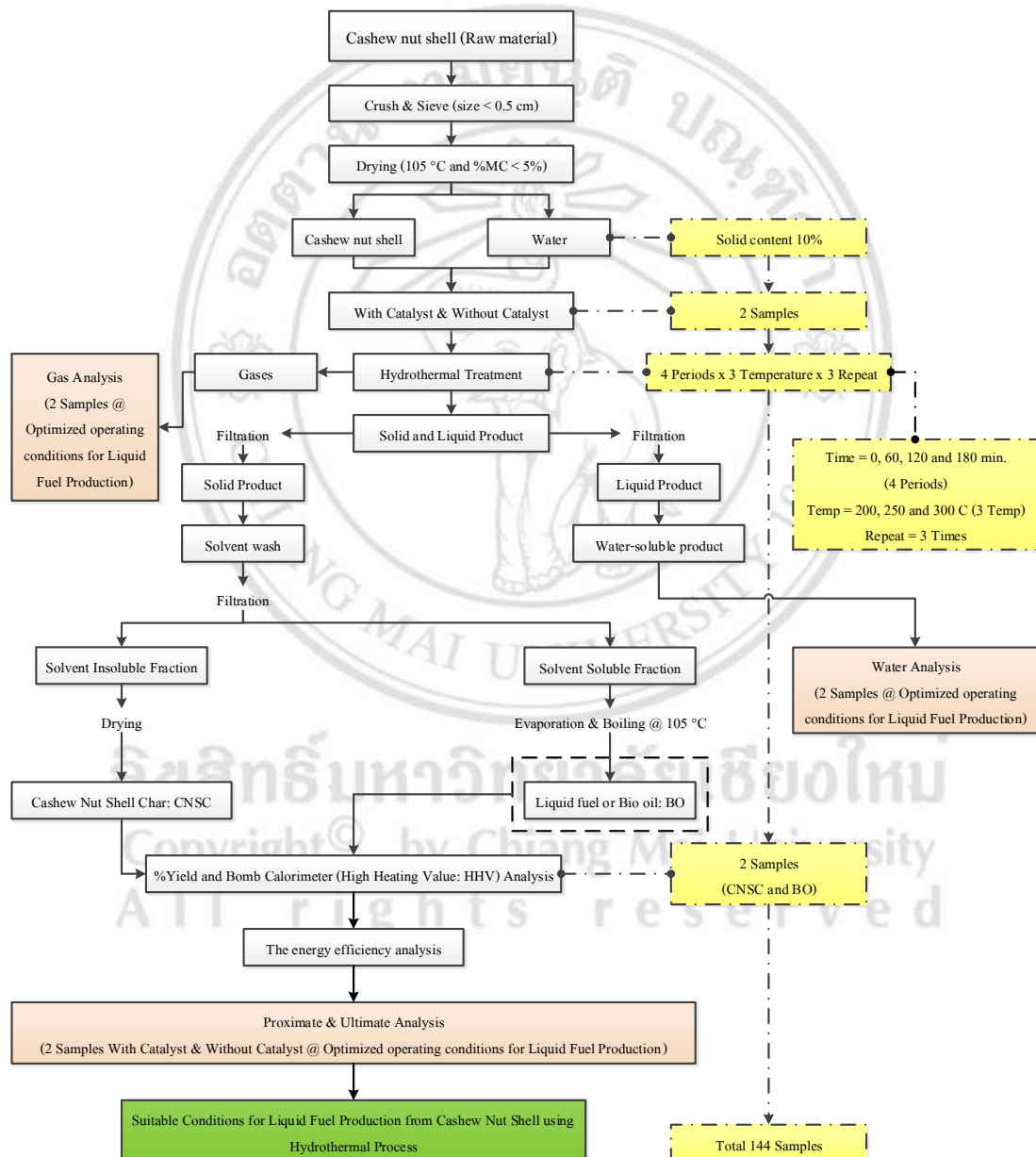


รูปที่ 1-25 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (เชื้อเพลิงเหลว CNSC และ น้ำเสีย)

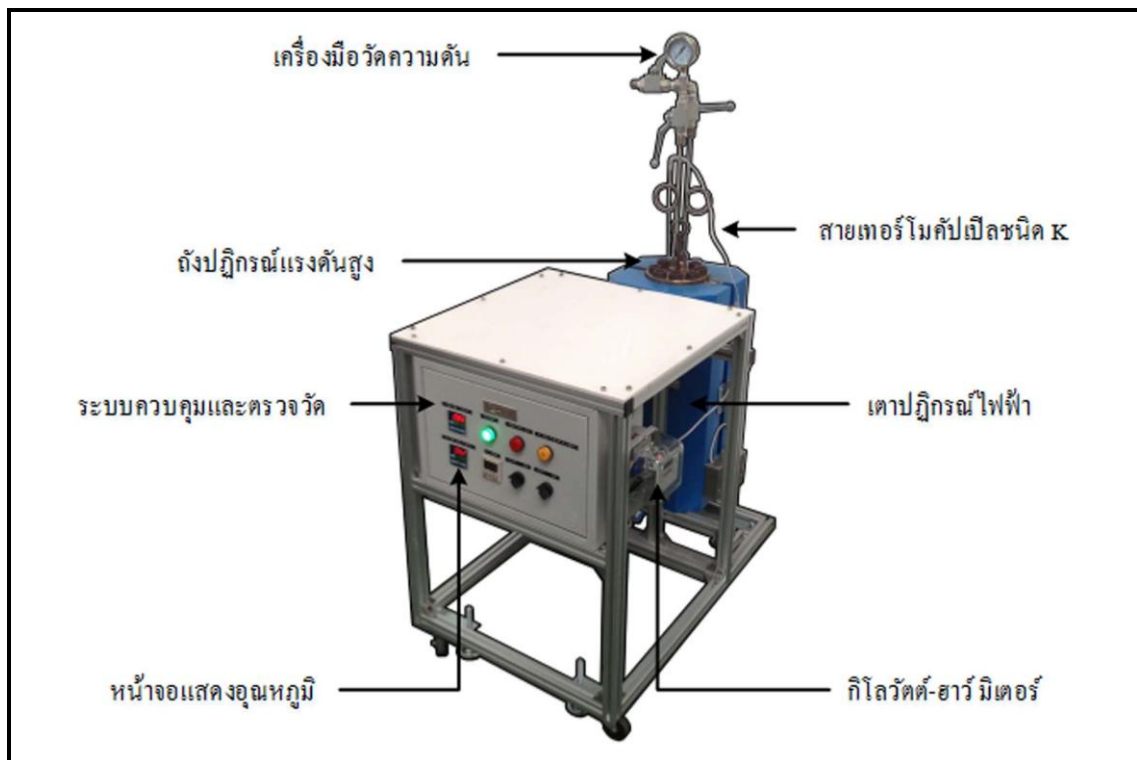
- 6) การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้

- 6.1) ดำเนินการตรวจวัดปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ ทั้ง 4 ผลิตภัณฑ์ คือ ผลผลิตที่เป็น 1. เชื้อเพลิงเหลว 2. CNSC 3. น้ำเสีย และ 4. ก๊าซ
- 6.2) การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงเหลว และ CNSC ดังแนวทางต่อไปนี้
 - 6.2.1) จัดเตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลว และ CNSC
 - 6.2.2) ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้
 - 1) ค่าความร้อนสูงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter
 - 2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH Meter
 - 6.2.3) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
- 6.3) การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย ดังแนวทางต่อไปนี้
 - 6.3.1) จัดเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย
 - 6.3.2) ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้
 - 1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH Meter
 - 6.3.3) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
- 7) ดำเนินการรวบรวมข้อมูลการทดสอบ แสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิ หรือกราฟ เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น และการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต “เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel)” จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 8) คัดเลือกตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลว ณ สถานะที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ จำนวน 2 ตัวอย่าง คือ 1. ตัวอย่างที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ตัวอย่าง และ 2. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (5 wt.%) 1 ตัวอย่าง

- 9) สรุปลักษณะที่เหมาะสม และเงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 10) จัดทำวิทยานิพนธ์และนำเสนองาน ที่ประกอบไปด้วยรายละเอียดที่สำคัญดังนี้ คือ ผลการทดลอง การสรุปและวิเคราะห์ผล รูปภาพการทดลอง รวมไปถึงปัญหาอุปสรรค และข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทดลองเพื่อขยายผล และการนำเสนอผลงานต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1-26 แสดงแผนภาพกระบวนการวิจัยผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล



รูปที่ 1-27 ระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 แนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลว
- 1.6.2 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
- 1.6.3 ได้กระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ภายในประเทศ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 2

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่มีลำดับขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานเริ่มต้นตั้งแต่กระบวนการออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ อาทิ เช่น เครื่องแก้ว เครื่องบด กระจายกรอง ฯลฯ พร้อมทั้งสารเคมี อาทิเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวทำละลาย ฯลฯ เครื่องมือตรวจวัดและวิเคราะห์ รวมไปถึงการจัดลำดับขั้นตอนการวิจัย การเตรียมเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ การกำหนดเงื่อนไขในการทดลองแต่ละครั้งกล่าวคือ การใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง การกำหนดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 250 และ 300 °C พร้อมทั้งการกำหนดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาหลังจากที่อุณหภูมิถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้ 4 เวลา คือ ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา 60 120 และ 180 นาที เพื่อให้การได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็น เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง และ ก๊าซ จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปสู่กระบวนการตรวจวัด และการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น อาทิ เช่น ค่าความร้อน องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ดังแสดงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยต่างๆ ต่อไปนี้

2.1 การออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

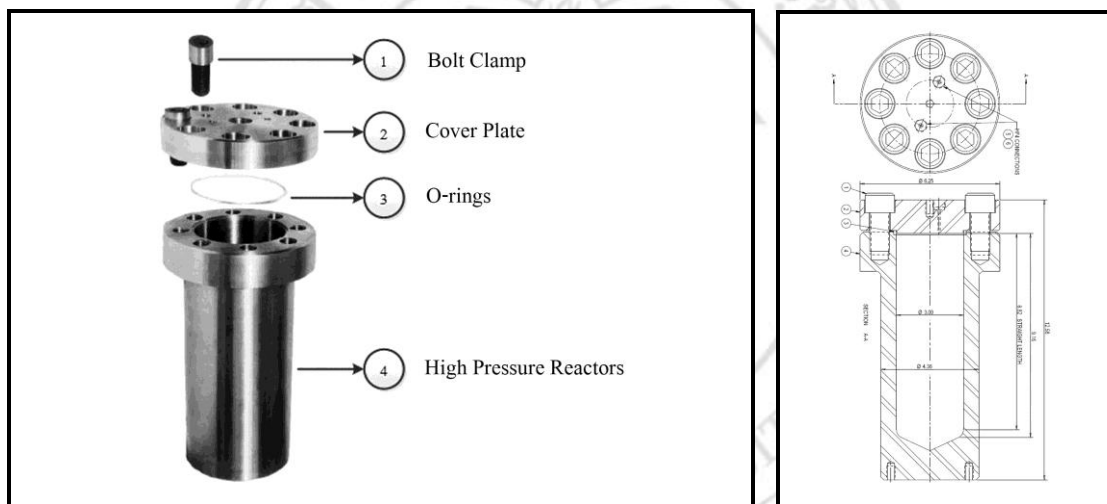
ระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ ที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ 1. ถังปฏิกรณ์ความดันสูง 2. เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า และ 3. ระบบควบคุมและตรวจวัด ซึ่งในภาพรวมระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้างดงามกล่าวมีขอบเขตการใช้งานภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความดันสูงสุดไม่เกิน 300 °C และ 8 MPa ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อไปนี้

2.1.1 ถังปฏิกรณ์ความดันสูง

ที่มาของการออกแบบถังปฏิกรณ์ความดันสูง เกิดจากเป้าหมาย และเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการงานวิจัย คือการให้ความร้อนแก่น้ำกลั่นบริสุทธิ์ จากอุณหภูมิห้อง จนถึง ณ สภาวะได้จุดวิกฤต หรือที่อุณหภูมิ 200-300 °C ความดัน 1.5-8 MPa ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกใช้ถัง

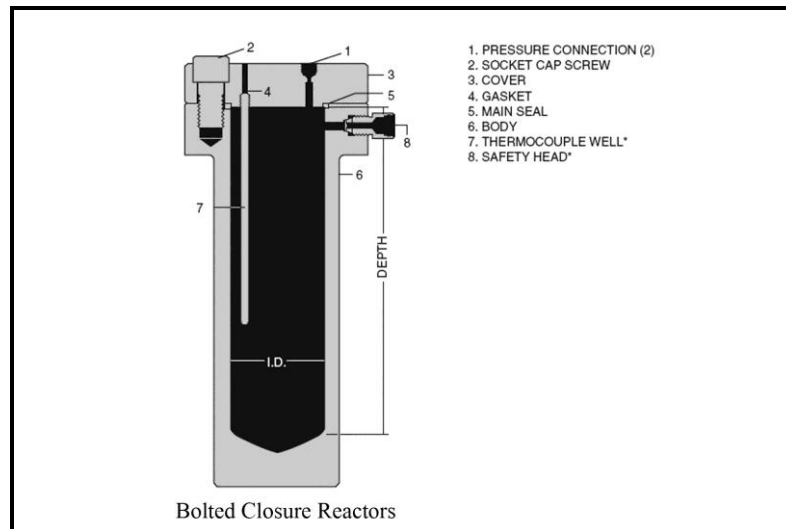
ปฏิกรณ์ความดันสูงแบบ Bolted Closure Reactors ที่ผลิตจากบริษัท HIP ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- 1) ถังปฏิกรณ์ความดันสูง (High Pressure Reactor) มีปริมาตรความจุภายในประมาณ 1 ลิตร สามารถรับความดันในช่วงการทำงาน (Working Pressure) และอุณหภูมิได้สูงสุด (Temperature Rating) 5,000 psi (34 MPa) และ 650 °F (343 °C) ตามลำดับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Inside Diameter) 3.00 นิ้ว ภายนอก (Outside Diameter) 4.38 นิ้ว และความลึก 9.16 นิ้ว มีน้ำหนักประมาณ 50 ปอนด์ (22.68 kg) ทำจากสแตนเลสเกรด 316 S.S. ขึ้นรูปแบบไร้รอยตะเข็บ (Seamless)



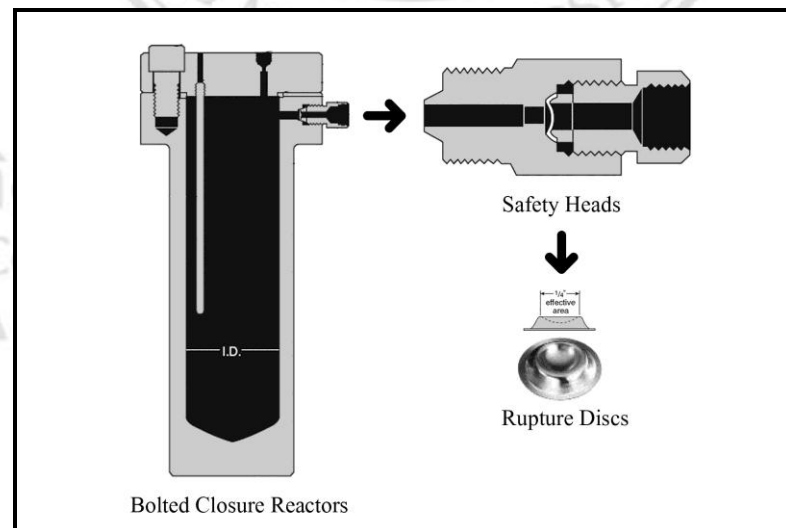
รูปที่ 2-1 ถังปฏิกรณ์ความดันสูงแบบ Bolted Closure Reactors

- 2) ฝาปิดด้านบน (Cover Plate) เป็นแบบหน้าแปลน ประกอบด้วยวงแหวน (O-ring) สแตนเลส ชนิดใช้งานได้นานต่อเนื่องสำหรับไว้ป้องกันการรั่วไหล และน๊อต (Bolt Clamp) จำนวน 8 ตัว สำหรับยึดฝาปิดให้ติดกับตัวถังปฏิกรณ์ความดันสูง
- 3) มีท่อด้านบนฝาปิดจำนวน 2 ท่อ ขนาด 0.25 นิ้ว เพื่อใช้สำหรับการติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure Gauge) และวาล์วสำหรับเปิด-ปิด พร้อมท่อสำหรับใช้ระบายก๊าซ เข้า-ออก โดยวาล์ว และท่อทำจากสแตนเลสเกรด 316 S.S. ที่สามารถทนความดันและอุณหภูมิสูง
- 4) มีท่อด้านบนฝาปิด ขนาด 0.0625 นิ้ว ที่ต่อลงไปยังด้านในของถังปฏิกรณ์ความดันสูง เพื่อการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง



รูปที่ 2-2 ตำแหน่งของท่อขนาด 0.0625 นิ้ว สำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

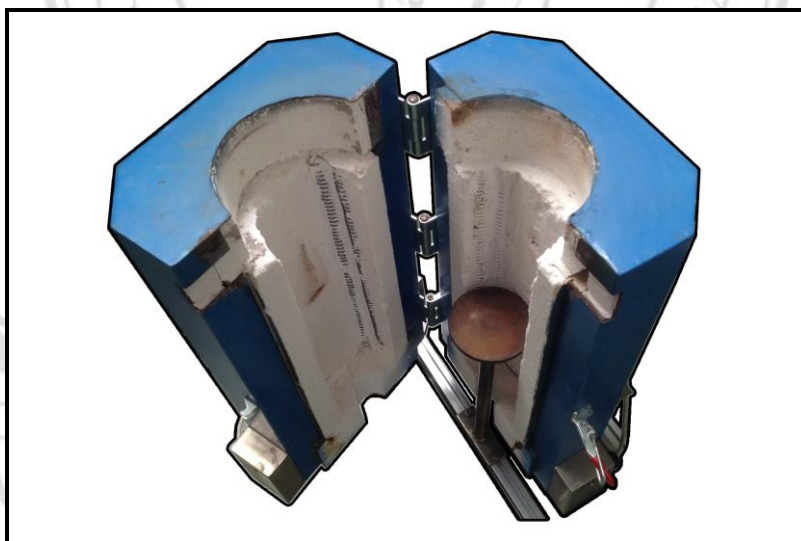
- 5) มีระบบป้องกันความปลอดภัย เมื่อถึงปฏิกิริยาที่มีความดันสูงเกินกว่าปกติในกรณีฉุกเฉินซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ
 - 5.1) Safety Heads ที่สามารถรับความดันได้สูงสุด 10,000 psi (69 MPa)
 - 5.2) Rupture disc สำหรับระบายความดันเกินปกติในกรณีฉุกเฉิน โดยเลือกใช้ Rupture disc ขนาด 0.25 นิ้ว มี Standard Burst Pressure 5,000 psi at 72 °F



รูปที่ 2-3 ระบบป้องกันความปลอดภัย Safety Heads และ Rupture disc

2.1.2 เตาปฏิกิริยาไฟฟ้า

จากข้อมูลคุณสมบัติของถังปฏิกิริยาความดันสูงข้างต้น สามารถคำนวณพื้นที่ผิวสำหรับรับความร้อนได้ประมาณ 812 ตารางเซนติเมตร และมีอุณหภูมิทำงานสูงสุดประมาณ 330°C ดังนั้นในการออกแบบ และสร้างเตापฏิกิริยาไฟฟ้า จึงสร้างให้ภายในประกอบไปด้วยขดลวดไฟฟ้า (Heater coil) ขนาด 3 kW ที่ผลิตจากบริษัท Kanthal มีขนาดความยาว 200 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้น ที่สามารถปรับอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกิริยาความดันสูงได้สูงสุดที่ 4 องศา/นาที่ และให้ความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีการติดตั้งไว้รอบๆ ถังปฏิกิริยาความดันสูง จากนั้นก็จะเป็นส่วนของฉนวนกันความร้อนที่สร้างจากคอนกรีตทนไฟ และเซรามิกไฟเบอร์ ที่มีความหนาประมาณ 8 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และในส่วนโครงสร้างหลักทางด้านภายนอกจะเป็นแผ่นเหล็กคัดขึ้นรูปความหนา 0.2 เซนติเมตร จึงทำให้เตापฏิกิริยาไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ภายนอก (กว้าง x ยาว x สูง) 30 x 30 x 60 เซนติเมตร ทั้งนี้เตापฏิกิริยาไฟฟ้าจะถูกติดตั้งไว้บนโครงสร้างฐานอลูมิเนียมที่แข็งแรง และมั่นคงพร้อมสำหรับการทดลอง



รูปที่ 2-4 เตาปฏิกิริยาไฟฟ้า

2.1.3 ระบบควบคุมและตรวจวัด

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุม ตรวจวัดอุณหภูมิ และความดัน รวมไปถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำการทดลองในแต่ละเงื่อนไข มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง จะมีความสำคัญเป็นอย่างมาก อันเนื่องมาจาก ถึงปฏิกิริยาความดันสูงมีผนังที่หนาประมาณ 0.69 นิ้ว และทำจากสแตนเลส เกรด 316 S.S. มีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) 0.5 kJ/kg K ที่ 0-100 °C และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) 16.2 W/m K ที่ 100 °C และ 21.4 W/m K ที่ 500 °C จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ไปยังน้ำกลั่นบริสุทธิ์และเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่อยู่ภายในถึงปฏิกิริยาความดันสูงให้ถึงอุณหภูมิเป้าหมายที่ตั้งไว้ จะต้องใช้ระยะเวลามากกว่า 30 นาที ดังนั้น ในการตรวจวัดอุณหภูมิจึงต้องตรวจวัดทั้งหมด 2 จุด คือ 1. อุณหภูมิภายในถึงปฏิกิริยาความดันสูง จะตั้งค่าอุณหภูมิไว้ตามแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และ 2. อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ผนังด้านนอก ของถึงปฏิกิริยาความดันสูง) จะตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดไว้ที่ประมาณ 330 °C ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าสูงเกินกว่า 343 °C (อุณหภูมิสูงสุดของถึงปฏิกิริยาความดันสูงที่สามารถทนรับได้)

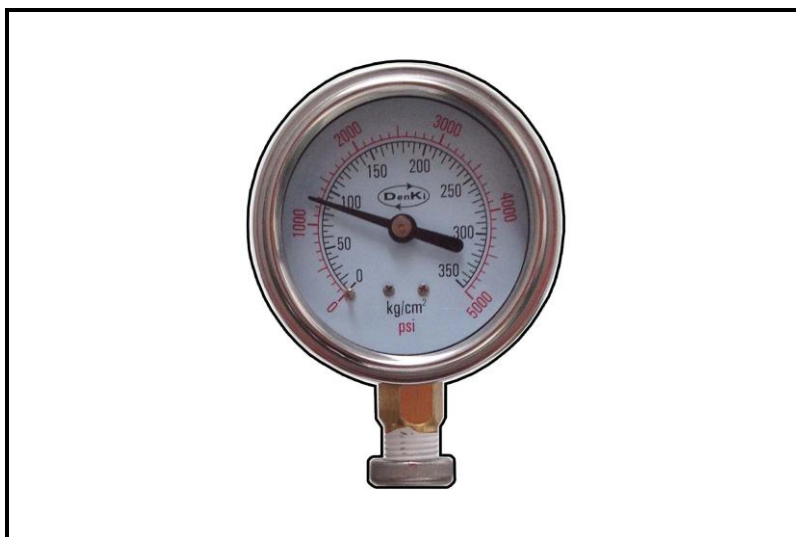
ทั้งนี้เครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิ จะประกอบไปด้วย สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple type K) ผ่าน Thermowell และหน้าจอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิตอลสำหรับปรับตั้งค่าได้ของบริษัท SHIMAX รุ่น MAC3D ทั้งหมด 2 ชุด โดยใช้ร่วมกับระบบ PID Controller และระบบตัดการทำงานของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าเพื่อป้องกันการเกิดความร้อนเกิน (Over heat)



รูปที่ 2-5 ระบบควบคุมและตรวจวัดอุณหภูมิภายในและภายนอกถังปฏิกรณ์ความดันสูง

2) เครื่องมือวัดความดัน

การเพิ่มขึ้นของความดันภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง (ระบบปิด) จะแปรผันตามอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์เมื่อได้รับความร้อน กล่าวคือ เมื่อดำเนินการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง จนถึงจุดเดือด (Boiling point) น้ำกลั่นบริสุทธิ์จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลว กลายเป็นไอ และมีความดันที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นในการทดลองแต่ละเงื่อนไขความดันที่เกิดขึ้น จะมีค่าที่แตกต่างกันตามแต่ละอุณหภูมิ และสามารถตรวจวัดค่าความดันดังกล่าวได้โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดที่เรียกว่า “เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)” โดยค่าความดันที่ตรวจวัดได้นี้จะเรียกว่า “ความดันเกจ” หมายถึง ความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของไหล หรือหมายถึงความดันที่เป็นผลต่างของความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure) ของของเหลวที่ตำแหน่งนั้นกับความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้เกจวัดความดันของบริษัท Denki ที่มีช่วงการวัดความดันได้ตั้งแต่ 0 จนถึง 350 kg/cm² หรือ 0 จนถึง 5,000 psi



รูปที่ 2-6 เกจวัดความดัน

3) กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์

อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ในแต่ละเดือนไขการทดลอง จะใช้กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ ที่ผลิตจากบริษัท SP Electric ซึ่งเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ สำหรับใช้กับไฟฟ้าเฟสเดียว ชนิด DD28 แรงดัน 220 โวลต์ สามารถรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 15 แอมป์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ อัตราส่วนการหมุนต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง 300 r/kWh



รูปที่ 2-7 กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์

2.2 การจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

2.2.1 อุปกรณ์ภาชนะเครื่องแก้ว

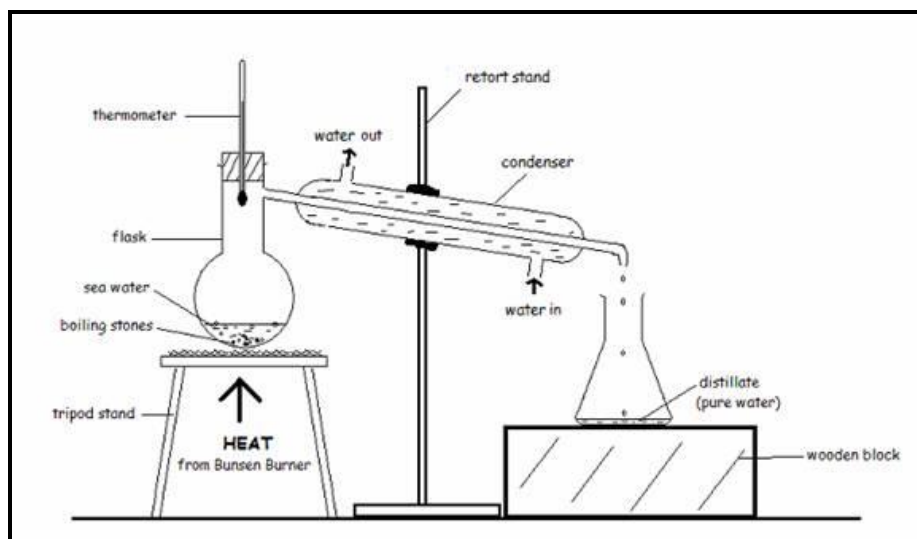
ในการทดลองจะใช้อุปกรณ์ภาชนะเครื่องแก้วหลากหลายชนิด อาทิเช่น ขวดปริมาตร ทรงกรวย (Erlenmeyer Flask) จานแก้ว (Petri dish) บีกเกอร์ (Beaker) กรวยกรองแก้ว (Glass funnel) ขวดแก้ว เป็นต้น เพื่อใช้สำหรับการบรรจุ และตรวจวัดปริมาณของสาร ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 2-8 อุปกรณ์ภาชนะเครื่องแก้ว

2.2.2 ชุดการกลั่นแบบธรรมดา

สำหรับชุดการกลั่นแบบธรรมดาหรือการกลั่นอย่างง่าย (Simple Distillation) จะใช้ในกระบวนการแยกของเหลวผสม (เชื้อเพลิงเหลว และตัวทำละลาย) ออกจากกัน โดยชุดการกลั่นแบบธรรมดาก็คือประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ 1. ฮีตเตอร์แบบแผ่นสำหรับให้ความร้อน 2. ขวดปริมาตรกลั่น (Distilling Flask) 3. ชุดอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) 4. ขวดปริมาตรทรงกรวย และ 5. เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 2-9 การกลั่นแบบธรรมดาหรือการกลั่นอย่างง่าย

2.2.3 เครื่องบด

เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิจัยมีขนาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นแนวทางการลดขนาดของตัวอย่างให้มีขนาดเล็ก และเป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งหมด จึงต้องอาศัยเครื่องบด ทั้งนี้เครื่องบดที่ใช้มีลักษณะคือ ตัวเครื่อง และใบมีดทำจากสแตนเลส มีกำลังไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ หมุนที่ความเร็ว 25,000 รอบต่อนาที ขนาดเครื่อง 280 x 280 x 450 มิลลิเมตร สามารถใส่ตัวอย่างได้สูงสุด 1,000 กรัม โดยประมาณ



รูปที่ 2-10 เครื่องบดเชื้อเพลิงชีวมวล

2.2.4 ตู้อบแห้ง

ตู้อบแห้ง ที่นำมาใช้จะมีหลักการทำงานแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) โดยมีแหล่งผลิตพลังงานจากขดลวดความร้อน ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้า 1,400 W. และใช้กระแสไฟฟ้าที่มีแรงดัน 220 V 50 Hz สามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุด 220 °C มีปริมาตรภายในขนาด 0.02 ลูกบาศก์เมตร (24 x 26 x 38 เซนติเมตร) ผลิตจากบริษัท Memmert จำกัด ชื่อรุ่น U10

ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในกระบวนการทดลอง จะนำตัวอย่างที่ผ่านการบดย่อยมาอบแห้งภายในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นที่ของตัวอย่างให้มีความความชื้นน้อยกว่า 5% มาตรฐานแห้ง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปใช้สำหรับการทดลองต่อไป



รูปที่ 2-11 ตู้อบแห้ง

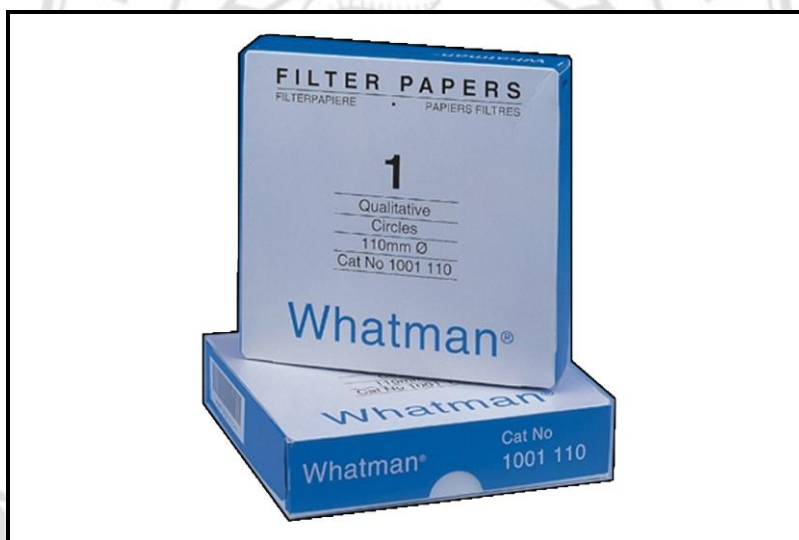
2.2.5 กระดาษกรอง

กระดาษกรอง (Filter Paper) คือ กระดาษที่มีคุณสมบัติที่คัดเลือกอนุภาค หรือสิ่งเจือปนออกจากสารละลาย หรืออากาศโดยการวางแบบตั้งฉากกับทิศทางการไหลของสารละลายที่ต้องการกรอง ทั้งนี้กระดาษกรอง จะมีขนาดของช่องว่างแตกต่างกันไปหลายขนาดด้วยกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะงานแต่ละชนิด คุณสมบัติที่สำคัญของกระดาษกรองประกอบด้วย ความคงทนเมื่อเปียก ขนาดของช่องว่าง ความสามารถในการกรองอนุภาค อัตราการไหลของสารที่ต้องการกรอง ประสิทธิภาพและความจุ ซึ่ง

กลไกที่สำคัญในการกรองด้วยกระดาษกรองจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ ปริมาตร (Volume) และผิว (Surface) โดยแบบปริมาตร อนุภาคจะถูกดักไว้ชั้นในหรือในตัวกระดาษกรอง ส่วนแบบผิว อนุภาคจะถูกดักไว้ที่ผิวของกระดาษกรอง

สำหรับกระดาษกรองที่ใช้ในกระบวนการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะใช้กระดาษกรองที่ผลิตจากบริษัท Whatman International จำกัด ประเทศไทย หมายเลข 1 (Whatman No.1) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร และมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- Particle retention in liquid	11 μm
- Filtration speed (approx.) Herzberg	150 s
- Air flow	10.5 s/100 ml/in ²
- Typical thickness	180 μm
- Basis weight	88 g/m ²



รูปที่ 2-12 กระดาษกรอง

2.2.6 ถูงเก็บก๊าซ

ในกระบวนการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยผลิตภัณฑ์จากกระบวนการดังกล่าวจะมีที่อยู่ 3 สถานะ คือ 1. ของเหลว 2. ของแข็ง และ 3. ก๊าซ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลว และของแข็ง จะใช้ขวดแก้วสำหรับการเก็บตัวอย่าง แต่ในส่วน of ตัวอย่างที่มีสถานะเป็นก๊าซจะเก็บโดยใช้ “ถูงเก็บก๊าซ (Gas

Sampling Bag)” ขนาด 5 ลิตร ยี่ห้อ SKC ที่มีคุณสมบัติในการเก็บก๊าซชนิดต่างๆ อาทิ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น ได้เป็นอย่างดี และเพื่อการนำก๊าซดังกล่าวไปวิเคราะห์ผล และหาองค์ประกอบต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 2-13 ถุงเก็บก๊าซตัวอย่าง

2.2.7 น้ำกลั่นบริสุทธิ์

น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (Distilled Water) คือน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ เมื่อถูกความร้อน โดยที่สิ่งที่เป็นของแข็งในน้ำจะไม่ระเหยไปพร้อมกับไอน้ำนั้น และเมื่อไอน้ำกระทบกับความเย็นก็จะเกิดการควบแน่นเปลี่ยนสถานะจากสถานะไอกลายเป็นหยดน้ำอีกครั้ง ดังนั้นน้ำที่ได้จากขบวนการกลั่นจึงมีความบริสุทธิ์ ปราศจากการปนเปื้อน มีค่า pH ที่เป็นกลางหรือมีค่าความเป็นกรดอ่อนๆ มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการทำน้ำให้บริสุทธิ์ขึ้นอีกหลายวิธี เพื่อนำน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม งานห้องปฏิบัติการ การล้างทำความสะอาด การทดสอบ การแลกเปลี่ยนไอออนในแบตเตอรี่รถยนต์ การตัดด้วยเลเซอร์ และอื่นๆ อีกมากมายเนื่องจากน้ำกลั่นบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายที่ดี และมีความสามารถในการทำละลายได้สูงกว่าน้ำทั่วไป

สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะต้องดำเนินการทดลองมากกว่า 100 ครั้ง และในแต่ละครั้งจะต้องใช้น้ำเป็นตัวกลางเพื่อให้เกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ดังนั้นจึงเลือกใช้น้ำกลั่นบริสุทธิ์ แทนน้ำประปาเพื่อที่จะสามารถควบคุมปัจจัย หรือสภาวะที่มีผลต่อการ

ทดลองให้เหมือนกันทุกๆ การทดลอง โดยจะใช้น้ำกลั่นบริสุทธิ์ประมาณ 200 มิลลิลิตร และเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 20 กรัม บรรจุลงไปในถังปฏิกรณ์ความดันสูงจากนั้น จึงดำเนินการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อกระตุ้นให้น้ำและเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ภายในถัง ปฏิกรณ์ความดันสูงเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ทั้งนี้ น้ำบริสุทธิ์ที่ใช้จะมี คุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้

- Electrical conductivity < 1.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at 25 °C
- Electrical resistivity > 0.7 $\text{M}\Omega \times \text{cm}$ at 25 °C
- Hardness < 0.1 mg/l as CaCO_3
- pH 6.5 ± 1
- Heavy Metal < 0.01 mg/l



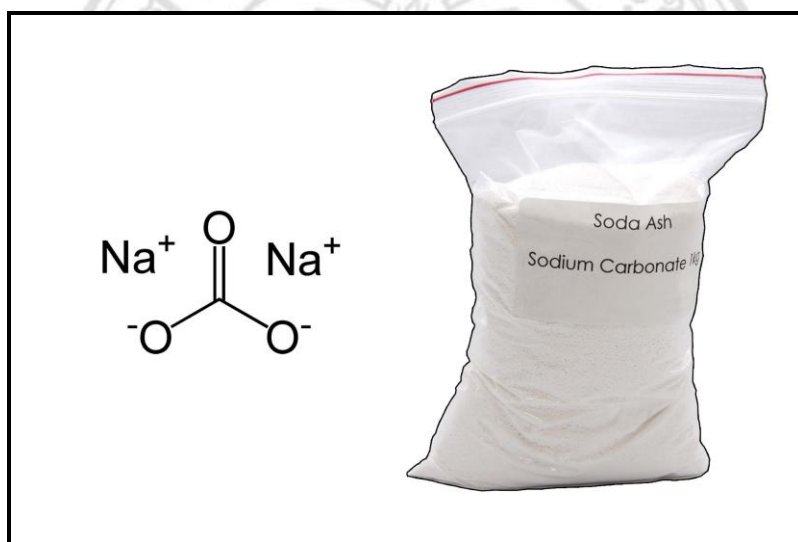
รูปที่ 2-14 น้ำกลั่นบริสุทธิ์

2.2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือสารที่เติมลงไปปฏิกิริยาแล้ว ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น หรือทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วยหรือไม่ก็ได้ แต่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ตัวเร่งเหล่านี้จะต้องมีปริมาณเท่าเดิมและมีสมบัติเหมือนเดิม การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาให้ต่ำลง จึงทำให้มีโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่า หรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์จำนวนมากขึ้น ปฏิกิริยาเคมีจึงเกิดเร็วขึ้น แต่จะไม่ทำให้พลังงานของปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากผลการศึกษา

ข้อมูลเบื้องต้นพบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า “โซเดียมคาร์บอเนต” มาใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะสามารถเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว ได้

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต หรือโซดาแอส ที่มีสูตรเคมี คือ Na_2CO_3 และมีคุณสมบัติเบื้องต้น คือ มีปริมาตรเชิงโมล 105.9885 g/mol ความหนาแน่น 2.54 g/cm³ จุดหลอมเหลว 851 °C จุดเดือด 1,633 °C เป็นสารประกอบเกลือของกรดคาร์บอนิก มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ละลายได้ในน้ำ มีฤทธิ์เป็นด่างแก่เมื่อละลายน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ พบในขี้เถ้าของพืชหลายชนิดและสาหร่ายทะเล เป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น แก้ว เซรามิกส์ กระดาษ พงชักฟอก สบู่ การแก้ไขนํ้ากระด้าง เป็นต้น



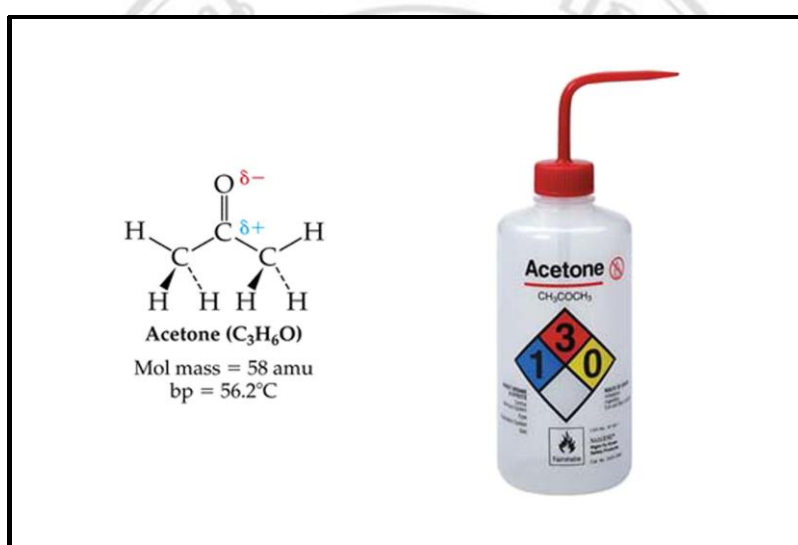
รูปที่ 2-15 ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต

2.2.9 ตัวทำละลาย

ตัวทำละลาย (Solvent) เป็นของเหลวที่สามารถละลายตัวถูกละลาย ที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซได้เป็น สารละลาย ตัวทำละลายที่คุ้นเคยมากที่สุดและใช้ใน ชีวิตประจำวันคือ “น้ำ” โดยปกติตัวทำละลายจะมี จุดเดือด ต่ำ และระเหยง่าย หรือ สามารถกำจัดโดย การกลั่นได้ โดยทั่วไปแล้วตัวทำละลายไม่ควรทำปฏิกิริยากับตัวถูกละลาย คือ ตัวทำละลายจะต้องมีคุณสมบัติ เนื้อ ทางเคมี สามารถใช้สกัด (Extract) สารประกอบที่ละลายในมันจากของผสมได้ด้วยอย่าง ที่คุ้นเคยได้แก่ การต้มกาแฟ หรือ ชา ด้วยน้ำร้อน ปกติตัวทำละลายจะเป็นของเหลวใสไม่มีสีและส่วนใหญ่จะมีกลิ่น

เฉพาะตัว ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ตัวทำละลายที่เรียกว่า “อะซิโตน” เพื่อแยกเชื้อเพลิงเหลว ออกจากของแข็ง และของเหลวที่ปะปนมาจากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว

อะซิโตน (Acetone) มีชื่อสามัญทางเคมี คือ 2-โพรพาโนน (2-Propanone) หรือ ไดเมทิลคีโตน (Dimethyl Ketone) มีสูตรโมเลกุล C_3H_6O เป็นของเหลวที่ระเหยง่ายไม่มีสีมีจุดหลอมเหลวที่ $-95.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และจุดเดือดที่ $56.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.819 (ที่ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) ละลายได้ดีใน น้ำ เอทานอล อีเทอร์ ฯลฯ และเป็นตัวทำละลายที่สำคัญมาก การใช้งานอะซิโตนที่คุ้นเคยกันมากที่สุดคือใช้น้ำยาล้างเล็บ อะซิโตน ยังใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม พลาสติก ไฟเบอร์ ยา และ สารเคมีอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2-16 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะซิโตน

2.2.10 ก๊าซไนโตรเจน

ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen: N_2) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ N และเลขอะตอม 7 เป็นอโลหะที่มีสถานะเป็น ก๊าซมีอยู่ทั่วไป โดยก๊าซไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของบรรยากาศ ของโลกถึงร้อยละ 78 และเป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ก๊าซไนโตรเจนยังเป็นส่วนประกอบในสารประกอบที่สำคัญหลายชนิด เช่น กรดอะมิโน แอมโมเนีย กรดไนตริก และสารจำพวกไซยาไนด์ เป็นต้น

คุณสมบัติที่สำคัญของก๊าซไนโตรเจน คือ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดไฟ จุดเดือดต่ำ น้ำหนักเบากว่าอากาศเล็กน้อย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยส่วนใหญ่จะนิยมนำก๊าซไนโตรเจนไปใช้ ปกคลุมป้องกันการทำ

ปฏิกิริยากับอากาศของสารเคมี หรือชิ้นงานต่างๆ ในอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี ยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ และยังมีใช้ป้องกันสิ่งสกปรก ความชื้นในอากาศ และจากคุณสมบัติที่มีจุดเดือดต่ำจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมถนอม หรือแช่แข็งอาหาร เก็บรักษาเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ไนโตรเจนยังถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในด้านการตรวจสอบการไหล ใช้กับระบบไฮดรอลิก เต็มลมยางเครื่องบิน และยังใช้ในการถ่ายเทก๊าซไวไฟชนิดเหลวอีกด้วย ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้นำก๊าซไนโตรเจนมาแทนที่อากาศในถังปฏิกรณ์ความดันสูง เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ความดันสูงระหว่างการทดลอง



รูปที่ 2-17 ก๊าซไนโตรเจน

2.3 เครื่องมือตรวจวัดและวิเคราะห์

2.3.1 เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ

ในขั้นตอนการทดลองจะใช้เครื่องมือตรวจวัด และบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ของบริษัท DIGICON รุ่น DIGICON DP-74SD และสายวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยมีตำแหน่งในการวัดอยู่ 2 ตำแหน่ง คือ 1. ผนังภายนอกของถังปฏิกรณ์ความดันสูง และ 2. ศูนย์กลางภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

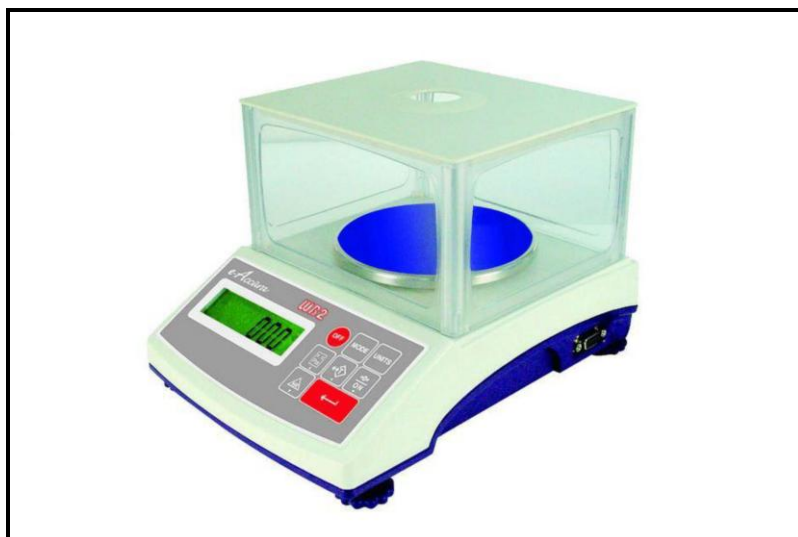


รูปที่ 2-18 เครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ DIGICON DP-74SD
และสายวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

2.3.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ผลิตจากบริษัท e-Accura รุ่น WB-600 สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 600 กรัม แสดงความละเอียดในการชั่งได้ 0.01 g ทั้งนี้เครื่องชั่งดังกล่าวมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เพราะในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องมีการชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง และสารเคมีต่างๆ อาทิเช่น เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำกลั่นบริสุทธิ์ เป็นต้น ทั้งก่อนและหลังการทดลอง เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาสมดุลมวล (Mass Balance) ของการทดลองในแต่ละเงื่อนไขต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2-19 เครื่องชั่งน้ำหนัก e-Accura รุ่น WB-600

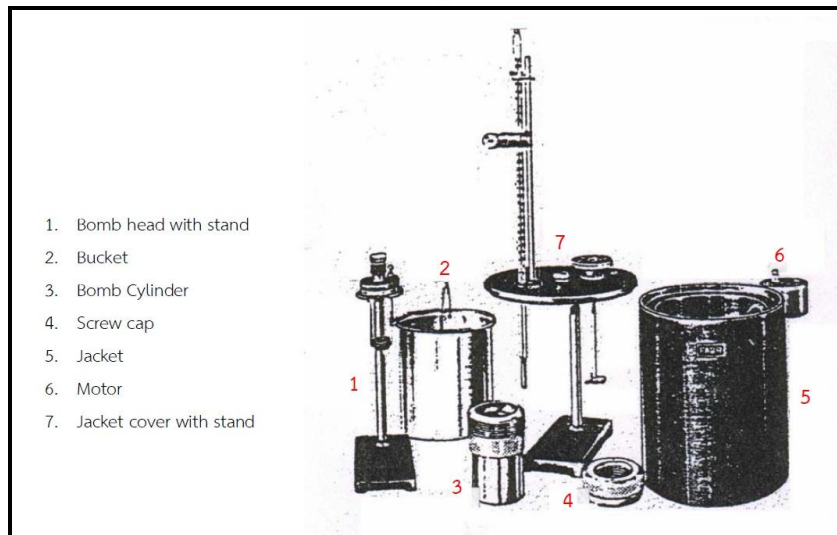
2.3.3 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์คุณสมบัติค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง และของเหลว จะใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์แบบอเดียบาติก (Adiabatic Bomb Calorimeter) ที่เป็นแบบป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม สามารถควบคุมอุณหภูมิของเสื้อฉนวน (Jacket) และของถังน้ำ (Steel Bucket) ให้เท่ากันตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างถังน้ำและน้ำขึ้น ทำให้การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นไปได้โดยสะดวก

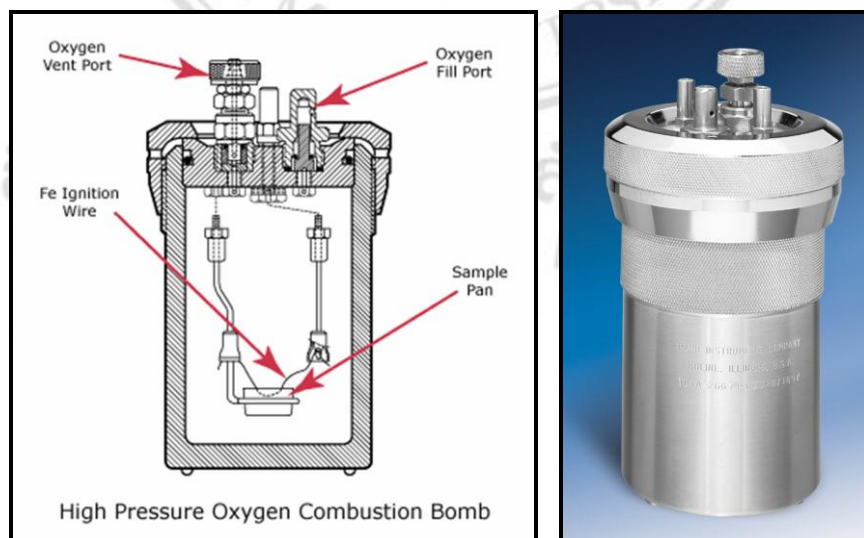
สำหรับบอมบ์แคลอริมิเตอร์แบบอเดียบาติกนั้น จะมีตัวบอมบ์ที่เป็นโลหะบรรจุอยู่ข้างในถังน้ำ ซึ่งถังน้ำจะตั้งอย่างหลวมๆ อยู่ข้างในเสื้อฉนวนอีกที โดยจะมีใบพัดกวน (Stirrer) ติดตั้งอยู่ให้ล้อมรอบด้วยน้ำที่บรรจุอยู่ในถังน้ำ ซึ่งใบพัดกวนจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ทางด้านนอกของแคลอริมิเตอร์ เทอร์โมมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ใช้สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการเกิดปฏิกิริยา สายไฟต่อจากส่วนบนของบอมบ์สู่ด้านนอกใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟเพื่อเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาหรือจุดระเบิดนั่นเอง

บอมบ์แคลอริมิเตอร์แบบอเดียบาติกจะจำกัดให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ตัวอย่างเกิดขึ้นในปริมาตรคงที่ ตัวอย่างที่จะทำการทดสอบจะถูกวางบนถ้วยสำหรับการสันดาป (Ignition cup) และลวดฟิวส์ (Fuse wire) จะต้องติดตั้งให้สัมผัสกับตัวอย่างที่จะทดสอบ ซึ่งจะกระทำอย่างระมัดระวัง บอมบ์จะถูกปิดอย่างหนาแน่นด้วยฝาปิด และก๊าซออกซิเจนความดันสูงจะถูกเติมเข้าไป ทั้งนี้ บอมบ์แคลอริมิเตอร์มีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้

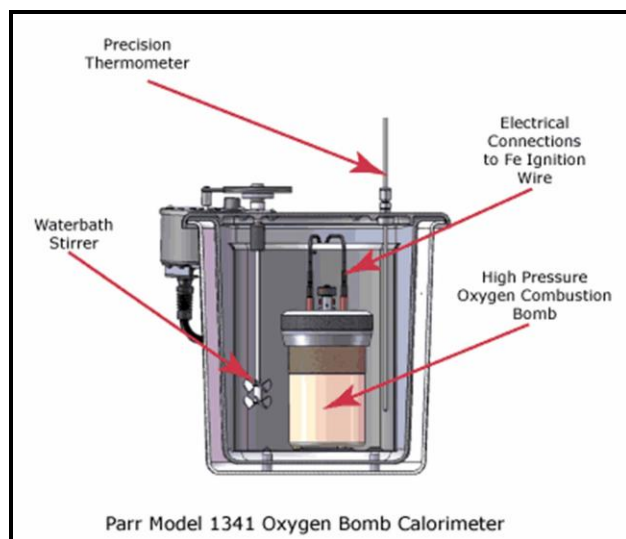
- 1) บอมบ์ (Bomb Cylinder) เป็นส่วนที่บรรจุตัวอย่าง และก๊าซออกซิเจนสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้
- 2) ถังโลหะ (Bucket) เป็นภาชนะเพื่อวัดปริมาตรของน้ำ และเป็นที่ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์และบอมบ์
- 3) เสื้อฉนวน (Jacket) เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอุปกรณ์ทั้งหมด



รูปที่ 2-20 องค์ประกอบต่างๆ ของตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ [57]



รูปที่ 2-21 บอมบ์ หรือ High Pressure Oxygen Combustion Bomb [58]



รูปที่ 2-22 ภาพตัดขวาง แสดงตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเสื้อฉนวน [58]



รูปที่ 2-23 ทอร์โมมิเตอร์ เสื้อฉนวน และตัวจุดระเบิด (Ignition Unit) ตามลำดับของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ Parr model 1341 [59]

2.3.4 เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ในกรณีตรวจวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และ เชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งในการตรวจวิเคราะห์ นั้นจะใช้เครื่องมือคนละชนิดกัน ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1) น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง Multi-Parameter Tester 35 Series pH / Conductivity / TDS / Salinity / Temperature



รูปที่ 2-24 เครื่อง Multi-Parameter Tester 35 Series สำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสีย

2) เชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

เชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จะดำเนินการทดสอบคุณสมบัติ ค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยใช้เครื่องมือวัด pH meter, sensION™1 HACH COMPANY U.S.A



รูปที่ 2-25 เครื่อง pH meter, sensION™1 HACH COMPANY U.S.A
สำหรับวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเชื้อเพลิงเหลว

2.3.5 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ

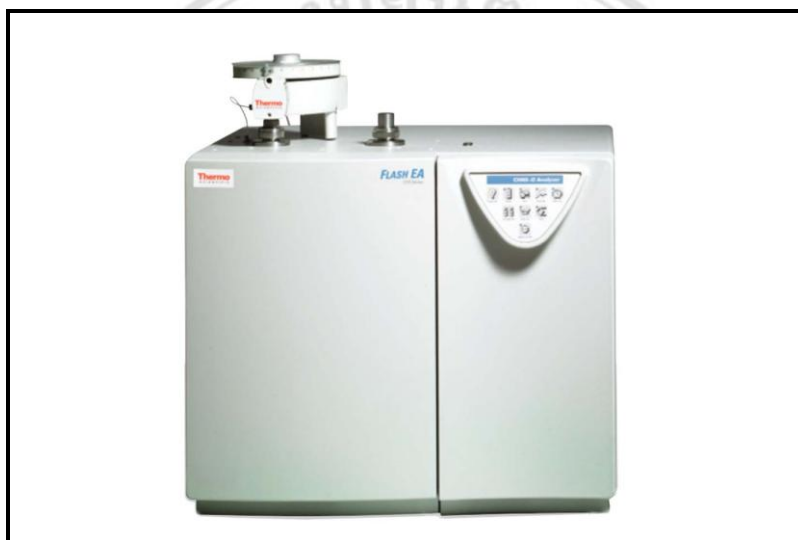
การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณของเชื้อเพลิงเหลว จะใช้เครื่องมือ Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA7 PERKIN ELMER โดยเครื่องมือดังกล่าวจะใช้หลักการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักที่หายไป เนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบในตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 1,300 °C



รูปที่ 2-26 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณของเหลว (Thermogravimetric Analyzer)

2.3.6 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ

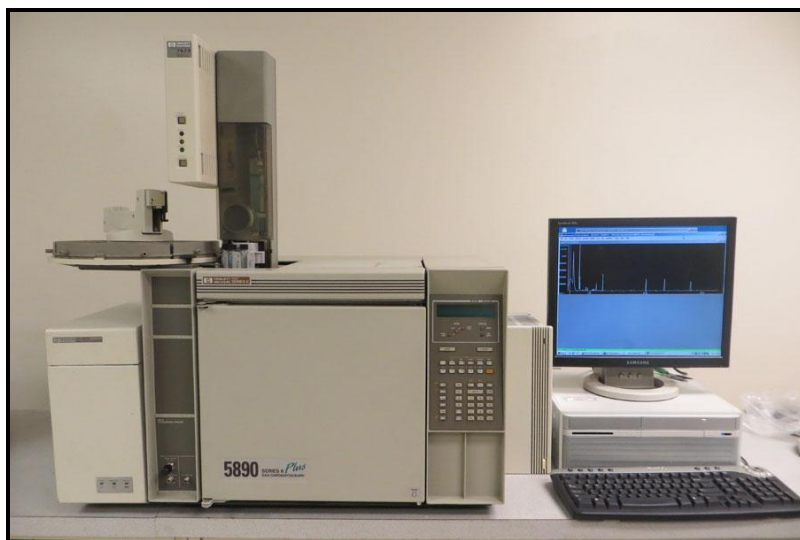
เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลว จะใช้เครื่องมือ CHNS-O Analyzer และ N/Protein Analyzer รุ่น Flash 1112 Series EA THERMOQUEST ทั้งนี้เครื่องมือดังกล่าวจะสามารถวิเคราะห์ธาตุ C H N S และ O ในตัวอย่าง ได้ทั้งของแข็งและของเหลวโดยอาศัยหลักการเผาไหม้ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้กลายเป็นก๊าซผสม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งตัวอย่างที่จะนำมาตรวจวิเคราะห์จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน อาทิเช่น สารเคมี สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ยาง พอลิเมอร์ ดินตะกอน เป็นต้น



รูปที่ 2-27 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบแยกธาตุ (CHNS-O Analyzer)

2.3.7 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบ

เครื่องวิเคราะห์สารประกอบเชื้อเพลิงเหลว จะใช้เครื่องมือ Gas Chromatograph-Mass Spectrometer Trace GC Ultra/ISQ MS Thermo Scientific Inc. USA รุ่น HP 5890 GC ที่สามารถแยกสารผสมโดยเปลี่ยนสารให้เป็นก๊าซที่อุณหภูมิไม่เกิน 300 °C ตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซล แอลกอฮอล์ และสารตกค้างจำพวกยาฆ่าแมลง ยาฆ่าแมลงในน้ำมันปาล์มดิบ หรือในตัวอย่างทางธรรมชาติ เป็นต้น



รูปที่ 2-28 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบ (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer)

2.3.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซจะดำเนินการตรวจวัดก๊าซหลักๆ อันได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) ไฮโดรเจน (H_2) และ ไนโตรเจน (N_2) โดยใช้เครื่องมือ Gas Chromatograph GC-8A Basic GC ของบริษัท Shimadzu จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์โดยการฉีด (Injector port) ก๊าซตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C เพื่อแยกก๊าซตัวอย่าง จากนั้นก๊าซแต่ละชนิดที่ระเหยจะเคลื่อนที่เข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ (Detector) และถูกบันทึกเป็น โครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder) เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2-29 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (Gas Chromatograph)

2.3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำเสีย

สำหรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะนำไปตรวจวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารละลาย และธาตุอาหารต่างๆ อาทิเช่น ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) กำมะถัน (S) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และโบรอน (B) ซึ่งในกระบวนการตรวจวิเคราะห์จะต้องอาศัยอุปกรณ์เครื่องมือ และสารเคมีต่างๆ หลากหลายชนิด ดังตัวอย่างรายละเอียดการวิเคราะห์ต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ไนโตรเจน

การวิเคราะห์ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย จะใช้วิธี Kjeldahl method เป็นวิธีที่สะดวกและให้ผลถูกต้อง วิธีนี้ค้นพบในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์กชื่อ Jhon Kjeldahl และได้พัฒนาเรื่อยมาจนเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด โดยวิธีดังกล่าวมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 3 ขั้นตอน คือ 1. การย่อย 2. การกลั่น และ 3. การไทเทรต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1.1) ขั้นตอนการย่อย (Digestion) ขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็น $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เข้มข้น และใช้สารเร่งปฏิกิริยา เช่น CuSO_4 , Se , HgSO_4 , HgO หรือ FeSO_4 เป็นต้น สารเร่งเหล่านี้อาจใช้เพียงสารเดียวหรือสารผสม และควรหลีกเลี่ยงการใช้สารปรอทเพราะมีพิษสูง นอกจากนี้

ในขั้นตอนการย่อยเพื่อเพิ่มจุดเดือดให้สูงขึ้นนิยม เติม K_2SO_4 หรือ Na_2SO_4 ลงไปด้วย

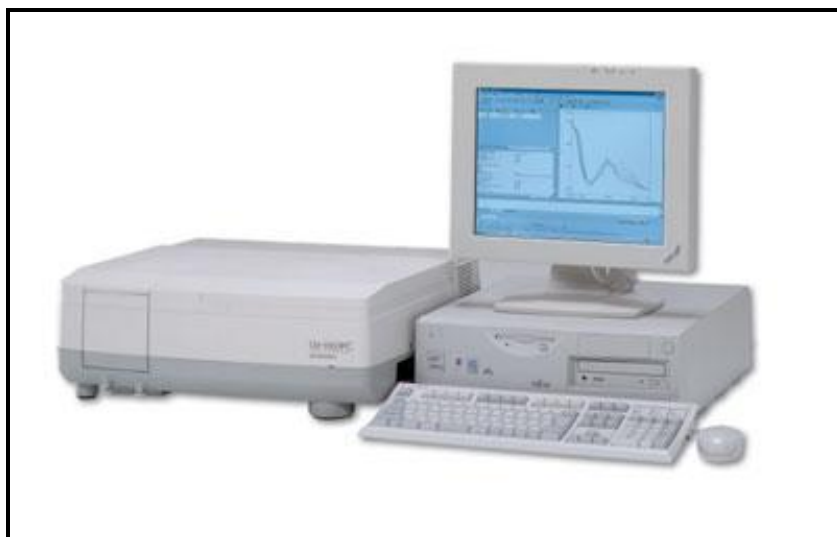
- 1.2) ขั้นตอนการกลั่น (Distillation) ขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยน $(NH_4)_2SO_4$ ที่เกิดจากการย่อยในขั้นตอนแรกไปเป็นก๊าซ NH_3 โดยเติม $NaOH$ ลงไป จากนั้นเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยกรดบอริก (H_3BO_3)
- 1.3) ขั้นตอนการไทเทรต (Titration) ขั้นตอนนี้เป็นการไทเทรตหาปริมาณ $H_2BO_3^-$ ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2-30 เครื่องวิเคราะห์ไนโตรเจน

2) การวิเคราะห์ฟอสฟอรัส

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในตัวอย่างน้ำเสีย จะใช้วิธี Molybdenum-blue method ซึ่งวิธีนี้จะทำการวิเคราะห์โดยนำสารละลายที่สกัดได้จากตัวอย่างน้ำเสีย ไปทำปฏิกิริยากับ Ammonium molybdate $((NH_4)_6MO_7O_{24} \cdot 4H_2O)$ เพื่อให้ฟอสฟอรัสกลายเป็นสารประกอบ Ammonium phosphomolybdate จากนั้นรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนนี้ด้วย $SnCl_2$ Hydrazine หรือ Ascorbic acid เพื่อให้ได้สารประกอบ Molybdenum blue จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometry) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสต่อไป



รูปที่ 2-31 เครื่องมือ Spectrophotometer สำหรับตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง และวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส

3) การวิเคราะห์โบรอน

การวิเคราะห์โบรอนในตัวอย่างน้ำเสีย จะใช้วิธี Azomethine-H Method โดยการนำตัวอย่างน้ำเสีย ไปผ่านกระบวนการสกัดด้วยสารละลาย อาทิเช่น น้ำร้อน HCl CaCl_2 BaCl_2 เป็นต้น ประมาณ 5-30 นาที จากนั้นจึงนำสารละลายที่มีโบรอนผสมอยู่มาผ่านกระบวนการทำให้เกิดสีเหลืองด้วยสารละลายอะโซมีทีนเอส และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโบรอนต่อไป

4) การวิเคราะห์ซัลเฟอร์

การวิเคราะห์ซัลเฟอร์ หรือกำมะถัน ในตัวอย่างน้ำเสีย จะใช้วิธี BaCl_2 Method ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้สารละลาย เช่น NaHCO_3 หรือ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ เป็นต้น ทำละลายตัวอย่างน้ำเสีย จากนั้นสารละลายที่สกัดได้ข้างต้น จะนำไปวิเคราะห์ปริมาณหรือความเข้มข้นของซัลเฟตไอออนด้วย วิธีวัดความขุ่น (Turbidimetry หรือ Nephelometry) ซึ่งวิธีนี้จะวิเคราะห์โดยเติม BaCl_2 ลงไปในสารละลายที่สกัดได้หากมี SO_4^{2-} อยู่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น และได้สารประกอบ BaSO_4 ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยจึงเกิดตะกอนขุ่นขาวขึ้น ทั้งนี้ในการวิเคราะห์จะนิยมเติมสารประเภทแอลกอฮอล์ เช่น $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ลงไปด้วย เพื่อลดการละลายของ BaSO_4 ให้ต่ำลง และในบางครั้งสามารถเติมสารเพิ่มความหนืด เช่น

Glycerin Gum Acacia หรือ Polyvinyl Alcohol ลงไปเพื่อต้องการให้ BaSO_4 แขนวลอยอยู่ในสารละลายได้มาก จากนั้นนำสารแขวนลอยดังกล่าวไปวัดค่าความขุ่นเพื่อวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ต่อไป

5) การวิเคราะห์ธาตุอื่นๆ

การวิเคราะห์น้ำเสีย เพื่อหาปริมาณโลหะหนัก อาทิเช่น โพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี เป็นต้น จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) หรือ AAS” เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยมีหลักการตรวจวิเคราะห์ คือ นำตัวอย่างน้ำเสียที่เตรียมในรูปของสารละลายมาดูด (Aspirate) เข้าไปในเปลวไฟ Air-Acetylene ของเครื่อง AAS พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อยู่ที่สถานะพื้น อะตอมที่สถานะพื้นจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะกระตุ้น โดยการดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก (Hollow Cathode Lamp) ที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ซึ่งธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน และในการตรวจวัดตัวอย่างการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ซึ่งความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่าง จะสามารถหาได้โดยการวัดเทียบกับความเข้มข้นของสารละลาย

มาตรฐาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2-32 เครื่องวิเคราะห์ธาตุอื่นๆ หรืออะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

2.4 ขั้นตอนการตรวจวัด และการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.4.1 การตรวจวัดปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้

ในการทดลองแต่ละครั้งจะมีขั้นตอนการตรวจวัด และชั่งตวง ทั้งก่อนและหลังการทดลอง กล่าวคือ สารตั้งต้น อันได้แก่ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ น้ำกลั่นบริสุทธิ์ และตัวเร่งปฏิกิริยา จะถูกชั่งน้ำหนัก ก่อนที่จะนำไปใส่รวมกันลงในถังปฏิกรณ์ความดันสูง จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองในสภาวะเงื่อนไขต่างๆ และเมื่อดำเนินการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมดคือ เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง (ถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์) น้ำเสีย ไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง (สำหรับปริมาณก๊าซ ที่เกิดขึ้นจะคำนวณจากผลต่างระหว่างสารตั้งต้น กับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้) เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ และสมดุลมวลของระบบต่อไป

2.4.2 การตรวจวัดปริมาณการใช้พลังงาน

ปริมาณการใช้พลังงาน คือ พลังงานไฟฟ้าที่เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ฮีตเตอร์) ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ถังปฏิกรณ์ความดันสูง จากอุณหภูมิห้อง ไปจนถึงอุณหภูมิที่ได้ตั้งเป้าหมายเอาไว้ ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการบันทึกข้อมูลเลขมิเตอร์ไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) หรือที่เรียกว่า หน่วย หรือ ยูนิต (Unit)) ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลอง และตลอดช่วงระยะเวลาการทดลอง จนถึงหยุดการทดลอง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะแสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นจึงนำค่าดังกล่าวไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของ

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

2.4.3 การทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

จากกระบวนการทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์หลัก 2 ชนิด คือ ของเหลว และของแข็ง จากนั้นจะนำมาทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value of Fuel Test) ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์แบบอะเดียบาติก ตามลำดับขั้นตอนและแนวทางในการทดลองดังต่อไปนี้

1) ก่อนการทดสอบ

- 1.1) เปิดฝาเสื้อฉนวน (Jacket) โดยต้องระวังไม่ให้กระทบกระเทือนเทอร์โมมิเตอร์
- 1.2) ให้ดำเนินการจัดเตรียมเชื้อเพลิง และ ตัวบอมบ์ (Bomb cylinder/bomb body)
- 1.3) บรรจุเชื้อเพลิง (Fuel) ลงในถ้วยบรรจุเชื้อเพลิง (Ignition Cup) โดยควบคุมให้น้ำหนักของเชื้อเพลิงไม่เกิน 1.1 กรัม
- 1.4) ติดตั้งลวดจุดระเบิด (Fuse wire) ความยาว 10 เซนติเมตร เข้ากับแท่นจุดระเบิด (Electrode Terminals) วางถ้วยบรรจุเชื้อเพลิงลงในที่รองรับ แล้วจัดให้ลวดจุดระเบิดสัมผัสกับเชื้อเพลิง โดยห้ามลวดแตะตัวถ้วยเป็นอันขาด
- 1.5) เติมน้ำบริสุทธิ์ 1.0 มิลลิลิตรลงในบอมบ์
- 1.6) นำแท่นจุดระเบิดที่ได้จัดเตรียมไว้แล้วนั้น บรรจุลงในบอมบ์แล้วปิดฝาบอมบ์ (Bomb Head)
- 1.7) เติมน้ำออกซิเจนลงในบอมบ์โดยควบคุมความดันให้อยู่ในช่วง 25-35 บรรยากาศ (atm)

- 1.8) เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำ (Bucket) ปริมาณ 2,000 มิลลิลิตร (± 0.5 มล.) โดยที่อุณหภูมิของน้ำควรต่ำกว่าอุณหภูมิของเสื้อฉนวน (Jacket) ประมาณ 2 องศาเซลเซียส (C)
- 1.9) วางถังน้ำลงในเสื้อฉนวน แล้วนำบอมบ์ใส่ในถังน้ำ โดยจัดวางตำแหน่งให้เหมาะสม และหากพบว่ามีการรั่วของก๊าซออกซิเจน ให้ยุติการทดลองโดยทันที
- 1.10) ต่อดึงสายไฟสำหรับการจุดระเบิด แล้วปิดฝาเสื้อฉนวน
- 2) ขณะดำเนินการทดสอบ
 - 2.1) เปิดสวิตช์มอเตอร์ของใบพัด (Stirrer) ให้กวนน้ำเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล (Steady state)
 - 2.2) จดบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 5 นาที (หมายเหตุ* ในการบันทึกเวลาขณะจุดระเบิด ขณะอุณหภูมิสูงสุด ฯลฯ ให้บันทึกให้มีความละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส)
 - 2.3) เมื่อครบ 5 นาทีและเริ่มเข้านาทีที่ 6 ให้กดปุ่มจุดระเบิดเพื่อเพลิง และจดบันทึกเวลา และอุณหภูมิจริงขณะจุดระเบิด (หมายเหตุ** ในขณะที่กดปุ่มจุดระเบิดนั้น ให้ถอยหลังห่างออกจากบอมบ์เป็นเวลา 20 วินาที ก่อนการอ่านอุณหภูมิค่าต่อไป)
 - 2.4) ให้กำหนดวินาทีที่เริ่มจุดระเบิดเป็นวินาทีที่ 0 แล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่วินาทีที่ 45 60 75 90 105 และ 120
 - 2.5) เมื่อครบวินาทีที่ 120 (หรือ 2 นาที) ให้บันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งค่าอุณหภูมิลดลง และคงที่ติดต่อกันเป็นเวลา 5 นาที
 - 2.6) ตรวจสอบค่าอุณหภูมิที่บันทึกไว้ทั้งหมด แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิสูงสุด

3) ภายหลังการทดสอบ

- 3.1) ปิดสวิทช์มอเตอร์ ปลดสายพาน ขกฝาเลื่อนวนออก เช็ดเทอร์โมมิเตอร์ให้แห้ง
- 3.2) ปลดสายจุกระเบิดและนำถังน้ำ (Bucket) ออกจากเสื้อฉนวน (Jacket)
- 3.3) นำตัวบอมบ์ (Bomb cylinder/Bomb body) ออกจากถังน้ำ เช็ดให้แห้ง ปลดข้อต่อจากบอมบ์อย่างช้าๆ จนหมด (ใช้เวลาอย่างน้อย 1 นาที)
- 3.4) ถอดส่วนหัวของบอมบ์ (Bomb head) ออก ตรวจสอบภายในถึงลักษณะการเผาไหม้ หากพบว่ามีร่องรอยของการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดปรากฏอยู่ ให้ยกเลิกผลการทดลองเดิม แล้วเริ่มทำการทดลองใหม่
- 3.5) วัดความยาวของลวดจุกระเบิดส่วนที่เหลือ
- 3.6) เช็ดทำความสะอาดอุปกรณ์การทดลองทุกชิ้น แล้วเก็บเข้าที่ให้เรียบร้อย

4) การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

การคำนวณ ค่าความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิง (Gross heat of combustion), H_g (หน่วย Cal/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ดังต่อไปนี้

$$H_g = (\Delta T W - C_1 - C_2 - C_3) / m$$

เมื่อ W = ค่าพลังงานเทียบเท่าของแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งได้จากการทำ Standardization โดยการเผาเชื้อเพลิงมาตรฐานในบอมบ์เพื่อคำนวณหาค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์แต่ละชุด ซึ่งในชุดอุปกรณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ 2,410 cal/°C

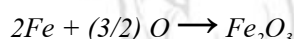
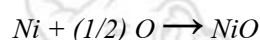
m = มวลของเชื้อเพลิง, g

C_1 หมายถึง ค่าแก้ (correction) จากค่าความร้อนเนื่องจากการเกิดกรดไนตริก (HNO_3) หรือ Heat of formation กรดไนตริก หากใช้สารละลาย 0.0709 N อัลคาไลน์ สำหรับการไตเตรท สามารถคำนวณได้จากสมการ มีหน่วยเป็น แคลอรี คือที่อุณหภูมิสูงๆ ก๊าซไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับก๊าซออกซิเจนและไอน้ำเกิดเป็นกรดไนตริก

$(N_2 + (5/2)O_2 + H_2O \Rightarrow 2HNO_3)$ [56] ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดในเครื่องย่นเข้มข้นและย่อมมีส่วนต่อการเกิด Smog ในบรรยากาศ ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดกรดไนตริกนี้ ควรใส่ก๊าซไนโตรเจนด้วยก๊าซออกซิเจนเสียก่อนที่จะมีการเผาไหม้ในบอมบ์

C_2 หมายถึง ค่าแก้ไขค่าความร้อนจากการเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือ Heat of formation ของกรดซัลฟูริก คำนวณจากสมการ มีหน่วยเป็นแคลอรี

C_3 หมายถึง ค่าแก้ไข (correction) จากค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของลวดจุดระเบิด (Heat of combustion of fuse wire) หากใช้ Parr 45C10 Ni-Cr Fuse wire เป็นลวดจุดระเบิด คำนวณได้ดังสมการ มีหน่วยเป็นแคลอรี ถ้าหากลวดจุดระเบิดทำจากนิกเกิลและเหล็ก (Ni and Iron) การเผาไหม้ของลวด จะเป็นดังนี้ [56]



ซึ่งความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ลวดฟิวส์จะคำนวณได้จาก ($\Delta U = \Delta U_{Sample} \cdot m_{Sample} + \Delta U_{Burned\ fuse} \cdot m_{Burned\ fuse} = -C_v \Delta T$) เมื่อฟิวส์ของส่วนที่เผาไหม้ไปสามารถหาได้จากการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการเผาไหม้ภายในบอมบ์ [56]

$$C_1 = V_1$$

$$C_2 = 13.7 \times V_2 \times m$$

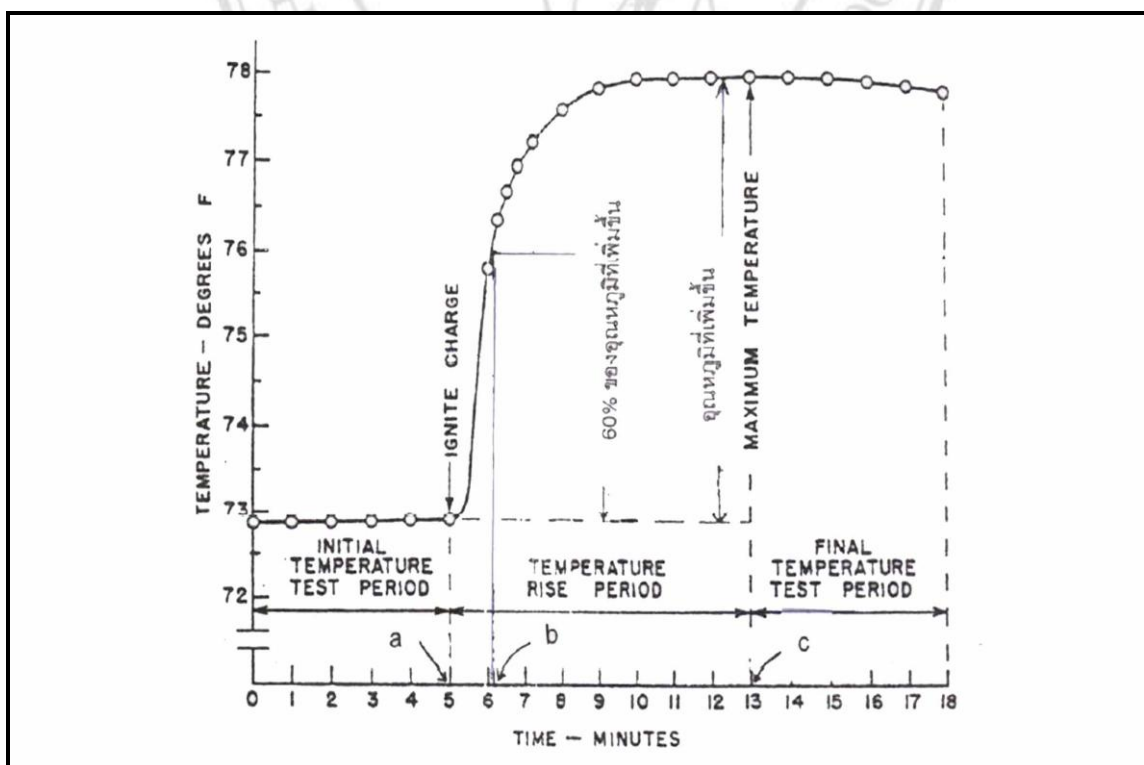
$$C_3 = 2.3 \times V_3$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรของสารละลายต่างมาตรฐานที่ใช้ในการหาความเป็นกรดเนื่องจากกรดไนตริก, mL
 V_2 = ปริมาณร้อยละของซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง, %
 V_3 = ความยาวของลวดจุดระเบิดที่เหลือจากการจุดระเบิด, cm

แต่โดยทั่วไปค่าของ C_1 และ C_2 จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งในทางปฏิบัติจริง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะคำนวณจะทำให้ ΔT ได้ไม่แน่นอน ดังสาเหตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อให้ค่า ΔT มีค่าที่ถูกต้องจึงใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\Delta T = T_c - T_a - R_1(t_2 - t_1) - R_2(t_3 - t_2)$$

- เมื่อ t_1 = เวลาที่เริ่มจุดระเบิด (จุด a ในรูปที่ 2-33)
 t_2 = เวลาที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็นร้อยละ 60 ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (จุด b ในรูปที่ 2-33)
 t_3 = เวลาที่อุณหภูมิสูงสุด (จุด c ในรูปที่ 2-33)
 T_a = อุณหภูมิขณะจุดระเบิด, °C
 T_c = อุณหภูมิสูงสุด, °C
 R_1 = อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 5 นาทีก่อนการจุดระเบิด, °C/min
 R_2 = อัตราการลดลงของอุณหภูมิในช่วงหลังจากเวลาที่อุณหภูมิสูงสุด, °C/min



รูปที่ 2-33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาของบอมบ์แบบอุณหภูมิคงที่

2.4.4 การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง

น้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะปะปนไปด้วยเชื้อเพลิงเหลว สารระเหย และเศษจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ หรือในบางกรณีก็จะมีสารตัวเร่งปฏิกิริยาปะปนมาด้วย โดยเมื่อดำเนินการทดลองในแต่ละเงื่อนไขเสร็จ ก็จะนำน้ำเสียที่ได้มาผ่านกระบวนการกรอง เพื่อแยกเศษสารแขวนลอยต่างๆ ออกน้ำเสีย จากนั้นจึงนำน้ำเสียไปทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง Multi-Parameter Tester 35 Series ต่อไป

เชื้อเพลิงเหลวที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะทำการทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยการส่งตัวอย่างไปตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ด้วยเครื่องมือวัด pH meter, sensION™1 HACH COMPANY U.S.A จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ผลอีกครั้งหนึ่ง

2.4.5 การทดสอบคุณสมบัติแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และสารประกอบ

เมื่อนำเชื้อเพลิงเหลวทุกเงื่อนไขการทดลองไปผ่านกระบวนการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และการตรวจวัดปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะคัดเลือกเชื้อเพลิงเหลว ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุดจำนวน 2 ตัวอย่าง คือ 1. เชื้อเพลิงเหลวที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และ 2. เชื้อเพลิงเหลวที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะนำไปเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แยกโดยตรงด้วยการใช้สารละลายอะซิโตน) อีก 1 ตัวอย่าง รวมเป็นตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวทั้งหมด 3 ตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติแบบประมาณ แบบแยกธาตุ และสารประกอบ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ผลต่อไป ดังแสดงรายละเอียดวิธีการ และเครื่องมือทดสอบต่อไปนี้

- 1) การทดสอบคุณสมบัติแบบประมาณ จะดำเนินการด้วยวิธีการทดสอบ WI-RES-TGA-001 แล ะ “ Metal oxide correlation of dried biofuels leaves by thermogravimetry and elemental analysis” Kumar, J.V., and Pratt, B.C., American Laboratory, Feb, 2003 ด้วยเครื่องมือทดสอบ Thermogravimetric Analyzer, TGA7, Perkin Elmer, USA

- 2) การทดสอบคุณสมบัติแบบแยกธาตุ จะดำเนินการด้วยกระบวนการวิธี WI-RES-CHNS-O-001 ด้วยเครื่องมือทดสอบ CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy Dynamic Flash Combustion
- 3) การทดสอบคุณสมบัติสารประกอบ จะดำเนินการด้วยกระบวนการวิธี WI-RES-GC-ISQMS-001 ด้วยเครื่องมือทดสอบ Gas Chromatograph Spectrometer, Trace GC Ultra / ISQ MS, Thermo Scientific Inc., USA

2.4.6 การทดสอบองค์ประกอบของก๊าซ

ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดลองภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง จะถูกเก็บเมื่อทำการลดอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงให้เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเรียบร้อยแล้ว โดยในการเก็บตัวอย่างจะให้ก๊าซจากถังปฏิกรณ์ความดันสูง ผ่านระบบดักความชื้นด้วยซิลิกาเจล (Silica gel) ก่อนที่จะนำก๊าซตัวอย่างไปเก็บไว้ในถุงเก็บก๊าซ จากนั้นจึงนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ ณ ภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทั้งนี้ก๊าซตัวอย่างที่นำไปตรวจวิเคราะห์จะมีจำนวนทั้งหมด 2 ตัวอย่าง กล่าวคือ ก๊าซที่ได้จากเงื่อนไขการทดลอง ณ ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ 1. แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา และ 2. แบบที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

2.4.7 การทดสอบน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสียที่ได้จากการทดลอง ณ เงื่อนไขประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ 2 แบบ คือ 1. แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา และ 2. แบบที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จะถูกเก็บรวบรวมเพื่อนำส่งตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารละลาย และธาตุอาหารต่างๆ ณ ห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการนำน้ำเสียที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ต่อไป

บทที่ 3

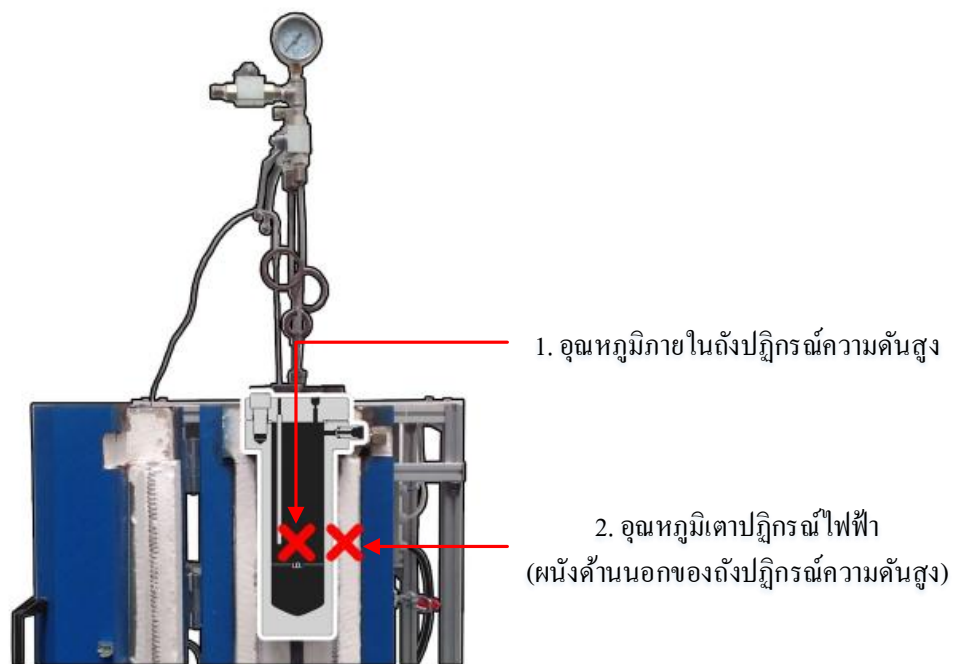
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง เครื่องมือวัดต่างๆ ไปจนถึงการทดลองในแต่ละเงื่อนไขที่ได้วางแผนไว้ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ตั้งแต่การทดสอบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า การวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ การวิเคราะห์ผลการทดลองในด้านต่างๆ อันได้แก่ อิทธิพลของอุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ และค่าความร้อนสูง จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน รวมไปถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว ก๊าซ สารประกอบของน้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ พร้อมทั้งวิเคราะห์สมดุลมวล และสมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ดังแสดงรายละเอียดของแต่ละหัวข้อต่อไปนี้

3.1 การทดสอบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

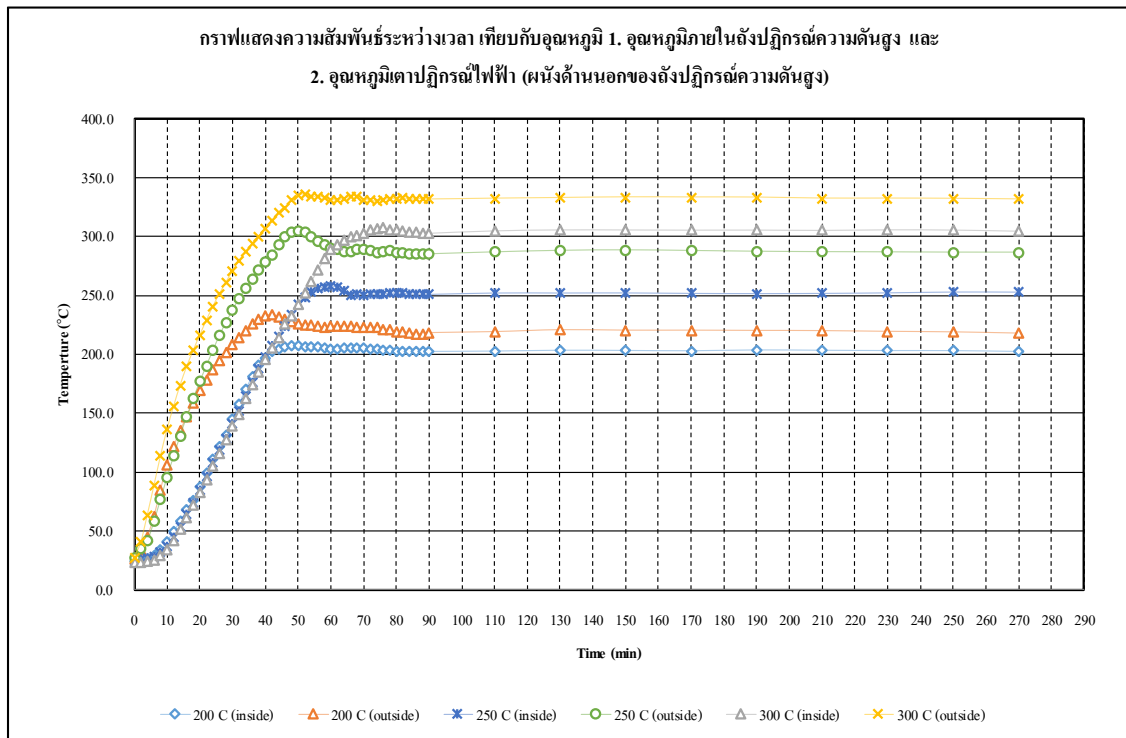
3.1.1 การทดสอบเพิ่มอุณหภูมิระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ภายหลังจากการออกแบบ และสร้างระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงได้ดำเนินการทดสอบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ด้วยการจัดเตรียมเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ น้ำ กลั่นบริสุทธิ์ อุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงเครื่องมือตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ โดยในกระบวนการทดสอบจะเริ่มให้อุณหภูมิแก่ถังปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิห้อง (25°C) ไปจนถึง อุณหภูมิที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้ คือ 200°C 250°C และ 300°C ตามลำดับ ทั้งนี้มีการตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ 2 ตำแหน่ง คือ 1. อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง และ 2. อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ผนังด้านนอกของถังปฏิกรณ์ความดันสูง) เพื่อเปรียบเทียบ และคำนวณหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง



รูปที่ 3-1 ตำแหน่งในการตรวจวัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง และอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ผนังด้านนอก ของถังปฏิกรณ์ความดันสูง)

จากผลการทดลองพบว่า ในการตั้งค่าอุณหภูมิที่เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 330°C อุณหภูมิภายนอกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ในอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 5.57 องศา/นาทิตั้งนี้ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แต่ในทางตรงกันข้ามภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 4.69 องศา/นาทิตั้งนี้ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นในการทดลองแต่ละเงื่อนไขจะต้องใช้เวลาประมาณ 45 55 และ 65 นาที ในการเพิ่มอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงให้มีอุณหภูมิจนถึงค่าเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้คือ 200 250 และ 300°C จากนั้นก็จะคงสถานะของอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 0 60 120 และ 180 นาที ตามแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



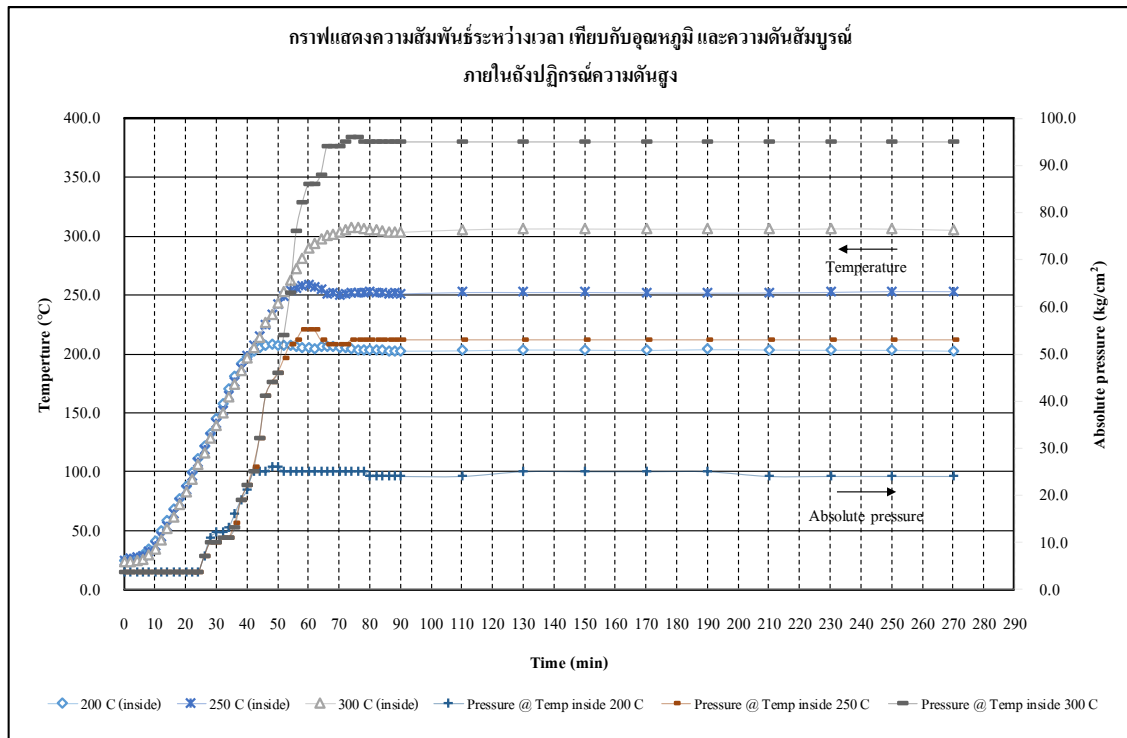
รูปที่ 3-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับอุณหภูมิ 1. อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง และ 2. อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (ผนังด้านนอกของถังปฏิกรณ์ความดันสูง)

3.1.2 การทดสอบความดัน และค่าความเค้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

ความดันภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง สามารถตรวจวัดได้จากเกจวัดความดันที่ติดตั้งอยู่กับถังปฏิกรณ์ความดันสูง ทั้งนี้ความดันเริ่มต้นก่อนทำการทดลองจะอยู่ที่ประมาณ 2.5 kg/cm^2 อันเป็นผลมาจากการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 2.5 kg/cm^2 ไล่อากาศที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงออกเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ที่อยู่ภายใน จากนั้นจึงดำเนินการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (25°C) ไปจนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้

จากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงจะส่งผลโดยตรงต่อความดัน กล่าวคือ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน และจากรูปที่ 3-3 จะสังเกตเห็นได้ว่าความดันที่สามารถอ่านค่าได้จากเกจวัดความดัน จะเริ่มต้นที่อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงอยู่ที่ประมาณ 110°C ความดันสัมบูรณ์ 7.0 kg/cm^2 จากนั้นความดันก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะคงที่เมื่ออุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงคงที่ หรือ ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C 250°C และ 300°C จะสามารถประมาณค่าความดันสัมบูรณ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงได้ 25 52 และ 94 kg/cm^2 ตามลำดับ หรือสามารถอ่านค่าจากเกจวัดความดันได้ประมาณ 24 51 และ 93 kg/cm^2 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ

คุณสมบัติของถังปฏิกรณ์ความดันสูงแล้วพบว่าความดันสัมบูรณ์สูงสุดที่ใช้ในการทดลอง (94 kg/cm²) มีค่าน้อยกว่าความดันในช่วงการทำงาน (Working Pressure) ของถังปฏิกรณ์ความดันสูงที่ 5,000 psi (34 MPa หรือ 352 kg/cm²) อยู่ประมาณ 3.8 เท่า



รูปที่ 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับอุณหภูมิ และความดันสัมบูรณ์
ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

สำหรับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง จะสอดคล้องกับความดันที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น และจะสามารถคำนวณหาได้จากสมการของ “ความเค้นในภาชนะความดันผนังบาง (Stress in Thin-Walled Pressure Vessels)” ซึ่งพบว่า ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C จะเกิดค่าความเค้นสูงสุดในแนวเส้นรอบวง และในแนวแกนนอน ประมาณ 19.86 MPa และ 9.93 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำค่าความเค้นสูงสุดในแนวเส้นรอบวงมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นของวัสดุสแตนเลส เกรด 316 S.S. ที่มีคุณสมบัติ Yield Strength 0.2% Offset 42 ksi (290 MPa) และ Ultimate Tensile Strength 84 ksi (579 MPa) จะพบว่ามามีค่าที่น้อยมาก คืออยู่ประมาณร้อยละ 6.85 ของค่า Yield Strength และ 3.43 ของค่า Ultimate Tensile Strength ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิต่างๆ

ลำดับ ที่	อุณหภูมิ เป้าหมาย (°C)	ความดันเกจภายใน ถังปฏิกรณ์ความดันสูง		ค่าความเค้น (MPa)	
		kg/cm ²	MPa	ในแนวเส้นรอบวง	ในแนวแกนนอน
1	200	24	2.35	5.12	2.56
2	250	51	5.00	10.89	5.44
3	300	94	9.12	19.86	9.93

3.1.3 สถานะ และคุณสมบัติของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

น้ำกลั่นบริสุทธิ์ 200 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 °C ในสถานะของเหลวจะบรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ความดันสูงแบบปิดที่มีปริมาตรภายใน 1 ลิตร และจะถูกให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 250 และ 300 °C ตามลำดับ ณ อุณหภูมิดังกล่าวน้ำกลั่นบริสุทธิ์จะอยู่ในสภาวะเป็นน้ำกึ่งวิกฤต ที่มีสถานะ คุณสมบัติของค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ และค่าคงที่การแตกตัว (Ion Product) แตกต่างไปจากน้ำที่สภาวะปกติ โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความดัน ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1) สถานะของน้ำกลั่นบริสุทธิ์

จากปริมาตรภายในของถังปฏิกรณ์ความดันสูง 1 ลิตร หรือ 0.001 m³ เมื่อบรรจุน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร หรือ 0.2 kg จะสามารถคำนวณหาปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) ของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ได้เท่ากับ 0.005 m³/kg ที่สภาวะเริ่มต้น ซึ่งค่าปริมาตรจำเพาะดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะของเหลว (v_f) และก๊าซ (v_g) ตลอดทั้ง 3 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ความดันสูงจะมีสถานะเป็นของผสมอิ่มตัว (Saturated Mixture) และมีค่าคุณภาพไอน้ำเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ 200 250 และ 300 ในปริมาณร้อยละ 3.05 7.67 และ 17.74 ตามลำดับ ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงปริมาณจำเพาะ สถานะของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ และค่าคุณภาพไอน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

ลำดับ ที่	อุณหภูมิ เป้าหมาย (°C)	สถานะของน้ำกลั่น บริสุทธิ์ภายในถัง ปฏิบัติการความดันสูง	ค่าคุณภาพไอน้ำ (X)	ปริมาณของผสมอิ่มตัว ในแต่ละสถานะ	
				ของเหลว (m _l) (g)	ไอน้ำ (m _g) (g)
1	200	ของผสมอิ่มตัว (Saturated mixture)	3.05%	193.91	6.09
2	250		7.67%	184.66	15.34
3	300		17.74%	164.51	35.49

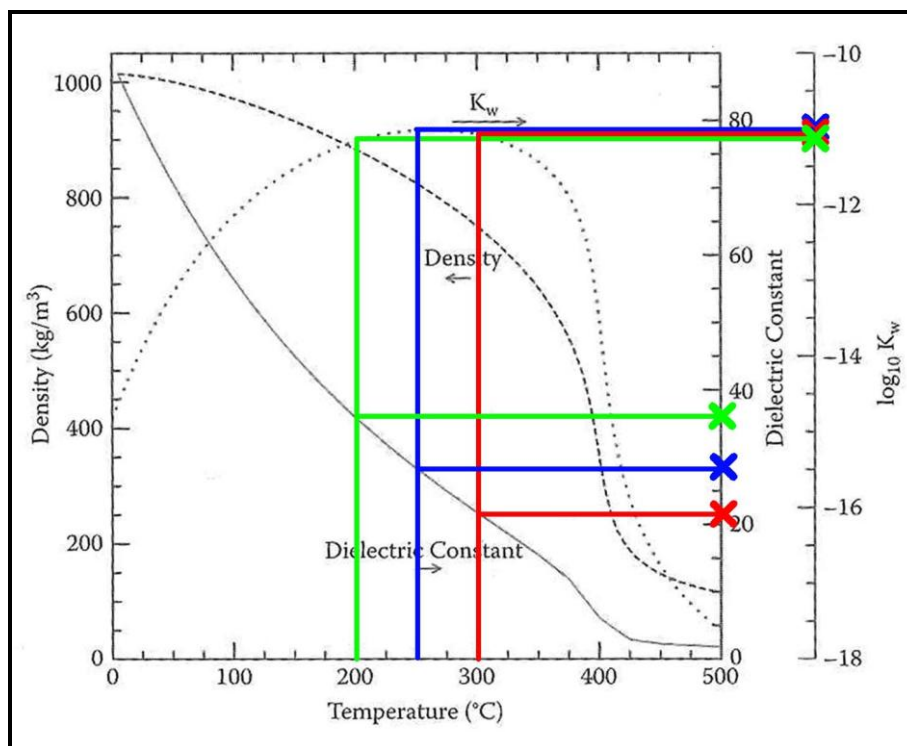
2) ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่า 79.0 Fm⁻¹ (เป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว) และจะมีค่าลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 200 250 และ 300 °C จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ 35.5 27.5 และ 21.2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 25 °C อาทิ เช่น เมทานอล มีเท่ากับ 32.7 Fm⁻¹ เอทานอล 24.6 Fm⁻¹ และอะซิโตน มีเท่ากับ 20.7 Fm⁻¹ เป็นต้น จะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกันตามลำดับ ดังนั้นจากคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ “น้ำกึ่งวิกฤตที่อุณหภูมิสูงขึ้น มีพฤติกรรมคล้ายกับตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว” จึงสามารถทำละลายสกัดและเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่ไม่มีขั้ว อาทิเช่น โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ได้ดีกว่าน้ำที่สภาวะปกติ

3) ค่าคงที่การแตกตัว

ค่าคงที่การแตกตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยตรง กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำกลั่นบริสุทธิ์จะส่งผลทำให้ค่า Log (K_w / mol²/dm⁶) เพิ่มขึ้นจาก -14.0 ที่อุณหภูมิ 25 °C ไปเป็น -11.3 ที่อุณหภูมิ 200 °C จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเป็น -11.0 ที่อุณหภูมิ 250 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปอีกเป็น 300 °C จะมีค่าลดลงเหลือ -11.1 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไฮโดรเนียม และไฮดรอกไซด์ไอออน จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่การแตกตัวจะเป็นปัจจัยที่เร่งปฏิกิริยาด้วยกรด และเบส (Acid-base Catalyst) คล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



รูปที่ 3-4 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่น ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ และค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ ตามอุณหภูมิที่ 200 250 และ 300 °C

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถึงปฏิกิริยาค้นความดันสูง ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ

ลำดับที่	รายละเอียด	Normal water	Subcritical water		
1	Temp. (°C)	25	200	250	300
2	Pressure (MPa)	0.10	2.45	5.10	9.22
3	Density, ρ (g cm ⁻³)	1.00	0.86	0.80	0.71
4	Heat capacity, C_p (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	4.22	4.51	4.86	5.65
5	Dynamic viscosity, η (mPa s)	0.89	0.14	0.11	0.09
6	Relative dielectric constant, ϵ_{RDC} (Fm ⁻¹)	78.50	36.50	27.50	21.20

ตารางที่ 3-3 (ต่อ) คุณสมบัติของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง
ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ

ลำดับที่	รายละเอียด	Normal water	Subcritical water		
7	Ionic product, pK_w	14.00	11.30	11.00	11.10

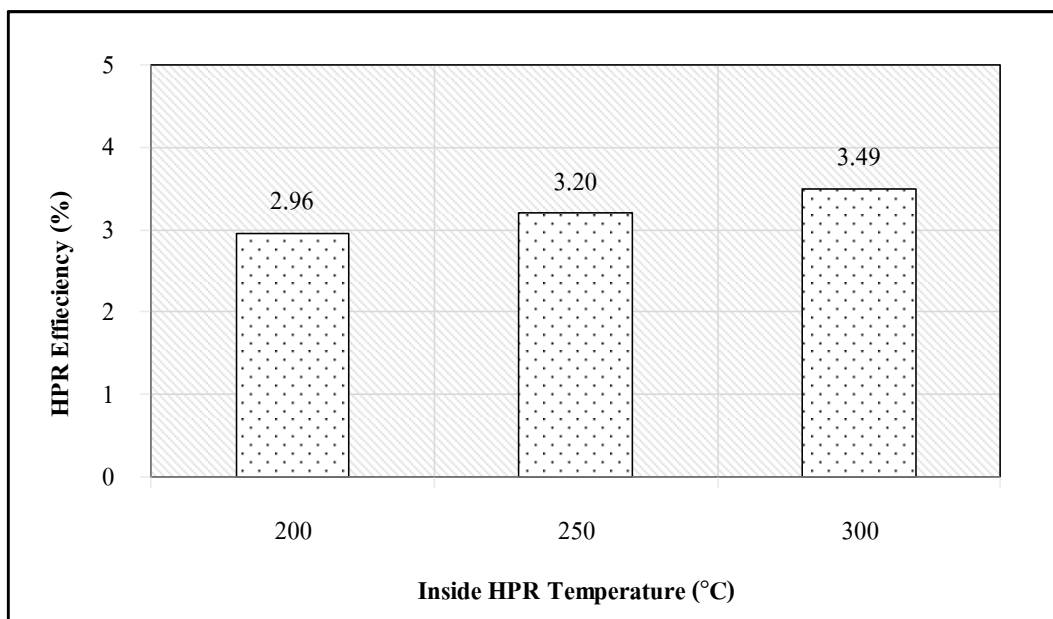
ที่มา : ข้อมูล ใน ลำดับ ที่ 3 – 5 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์
http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html 13 ธันวาคม 2557

ข้อมูลในลำดับที่ 6 – 7 เป็นข้อมูลที่อ้างอิงจาก Peterson et al. 2008. Energy Environ. Sci., 1: 32-65.

3.1.4 ประสิทธิภาพระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ในการทดลองเพิ่มอุณหภูมิ น้ำกลั่นบริสุทธิ์ผ่านระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า พบว่า ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพระบบสูงสุดร้อยละ 3.49 และจะมีค่าประสิทธิภาพลดลงเหลือ 3.20 และ 2.96 ที่อุณหภูมิ 250 และ 200 °C ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นว่าประสิทธิภาพระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าจะมีค่าที่ต่ำมาก อันเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนโดยฮีตเตอร์ (Heater) จะเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ไปให้แก่ผนัง ฝาปิด และนอตยึดทั้ง 8 ตัวของถังปฏิกรณ์แรงดันสูง ทั้งๆ ที่น้ำกลั่นบริสุทธิ์ต้องการพลังงานความร้อนที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิในปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ต้องให้กับส่วนต่างๆ ของถังปฏิกรณ์แรงดันสูง ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3-5 ประสิทธิภาพระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยจะดำเนินการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นทั้งการวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในแบบประมาณจะทำให้ทราบถึงค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ดังต่อไปนี้ ค่าความร้อนสูง ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และขี้เถ้า จากการวิเคราะห์ผลพบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าความร้อน 22.98 MJ/kg ซึ่งมากกว่าค่าความร้อนของไม้พื้น (15.99 MJ/kg) อันเป็นผลมาจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ประกอบไปด้วยส่วนผสมของน้ำมันอยู่ประมาณ 15-30 % wt./wt. ดังนั้นจากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น จึงมีความเป็นไปได้สำหรับการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาใช้ประโยชน์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์ในรูปแบบแยกธาตุ จะแสดงองค์ประกอบของธาตุที่ประกอบอยู่ภายในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อาทิเช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ เป็นต้น และจากการวิเคราะห์ผล พบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนสูงสุด

ประมาณ 61.12 % wt./wt. โดยธาตุคาร์บอนดังกล่าวมาจากสองส่วนหลักที่สำคัญ คือ 1. โครงสร้างของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และ 2 น้ำมัน CNSL ที่ปะปนอยู่ภายในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ดังนั้นจากองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนที่มีมากกว่าร้อยละ 50 จึงส่งผลทำให้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตพลังงานความร้อนได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 3-4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ
ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ลำดับ ที่	รายละเอียดการ วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์	หน่วยของผลการ วิเคราะห์	เครื่องมือ /วิธีการวิเคราะห์
การวิเคราะห์แบบประมาณ				
1	ค่าความร้อนสูง	5,490 (22.98)	Cal/g (MJ/kg)	Bomb calorimetry
2	ความชื้น	13.48	% dry basic	AWWA standard for granular activated carbon
3	สารระเหย	80.84	% dry basic	
4	คาร์บอนคงตัว	4.13	% wt./wt.	
5	ขี้เถ้า	1.55	% wt./wt.	
6	น้ำมัน CNSL	15-30	% wt./wt.	Acetone extraction
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ				
1	คาร์บอน (C)	61.12	% wt./wt.	CHNS analyzer
2	ไฮโดรเจน (H)	8.39	% wt./wt.	
3	ออกซิเจน (O)	27.68	% wt./wt.	
4	ไนโตรเจน (N)	1.11	% wt./wt.	
5	ซัลเฟอร์ (S)	1.70	% wt./wt.	

หมายเหตุ : ธาตุออกซิเจน (O) คำนวณผลจากค่าความแตกต่าง (Calculate by difference)

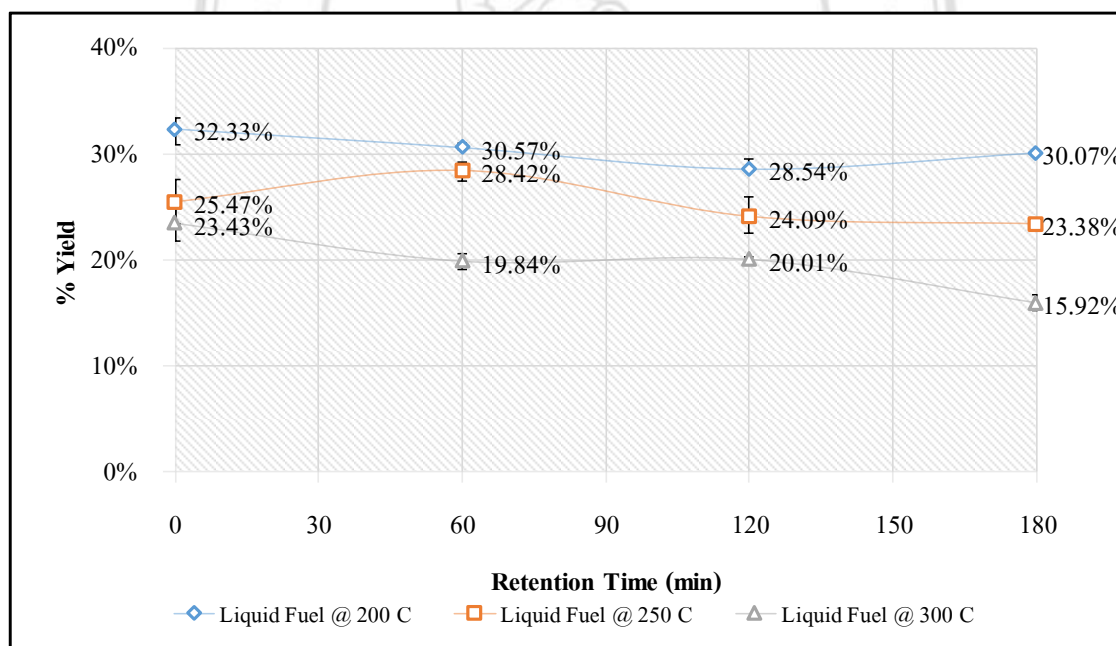
3.2.3 การวิเคราะห์สูตรเคมีอย่างง่ายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากการวิเคราะห์ในแบบแยกธาตุ และการคำนวณหาสูตรเคมีอย่างง่าย (Empirical formular) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้สูตรเคมีพื้นฐานของสารประกอบชีวมวล คือ $CH_xO_yN_zS_z$ ดังนั้นจึงได้สูตรเคมีอย่างง่ายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ

$\text{CH}_{1.636}\text{O}_{0.340}\text{N}_{0.016}\text{S}_{0.010}$ และจากสูตรเคมีอย่างง่ายดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ กับผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อไป

3.3 อุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลว

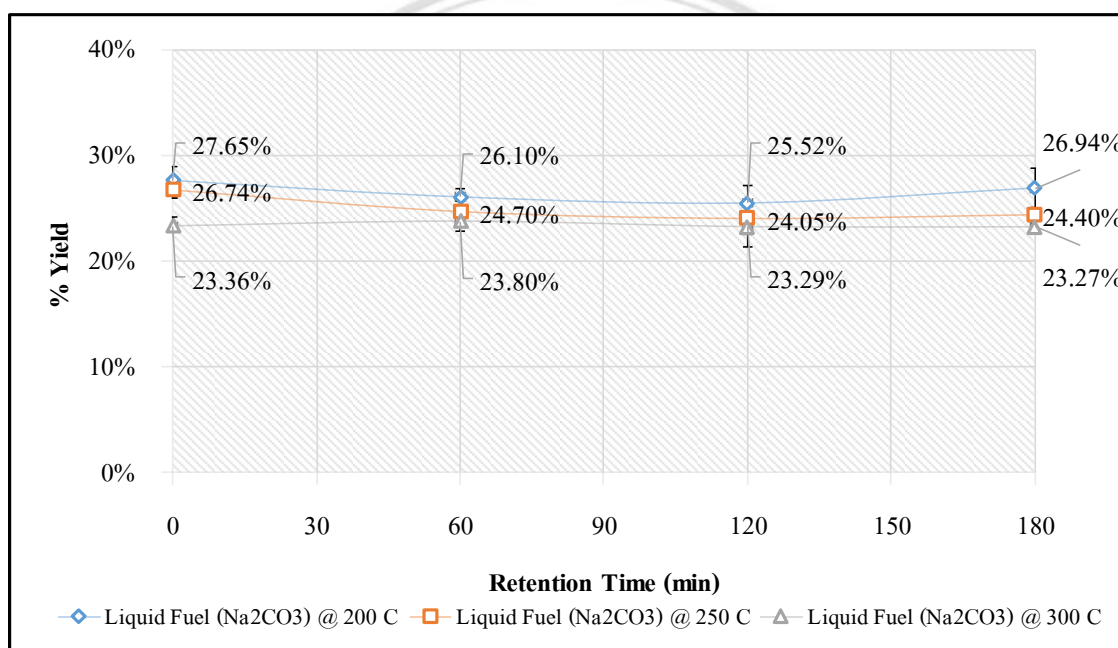
จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจาก 200 250 และ 300 °C จะมีส่งผลต่อปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ลดลง กล่าวคือ เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ตามเงื่อนไขระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา 60 120 และ 180 นาที) จะได้ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดร้อยละ 32.33 แล้วปริมาณเชื้อเพลิงเหลวจะค่อยๆ ลดลงเป็น 30.57 28.54 และ 30.07 ตามลำดับ และในทิศทางเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น เป็น 250 และ 300 °C ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ก็จะมีแนวโน้มที่ลดลง และอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 15.92-32.33 ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)

สำหรับในกรณีที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตร่วมทำปฏิกิริยาด้วย ณ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 200 °C จะส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีปริมาณลดลงและน้อยกว่าการทำปฏิกิริยาในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 และ 300 °C จะมีปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จะอยู่

ในช่วงประมาณร้อยละ 23.27-27.65 ดังรูปที่ 3-7 ทั้งนี้ผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว กล่าวคือ ในองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ประกอบไปด้วยลิพิด (Lipids) หรือสารชีวโมเลกุลที่ไม่ละลายในน้ำ (Water-Insoluble) อยู่เป็นจำนวนมาก จะทำปฏิกิริยาซาฟอนิฟิเคชัน (Saponification) กับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตที่มีสถานะเป็นด่าง เกิดเป็นกลีเซอรอลกับเกลือของกรดไขมันหรือสบู่ (Soap) ขึ้น โดยสบู่ดังกล่าวจะขัดขวาง และยับยั้งการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน หรือการควบแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ลดลง [60]



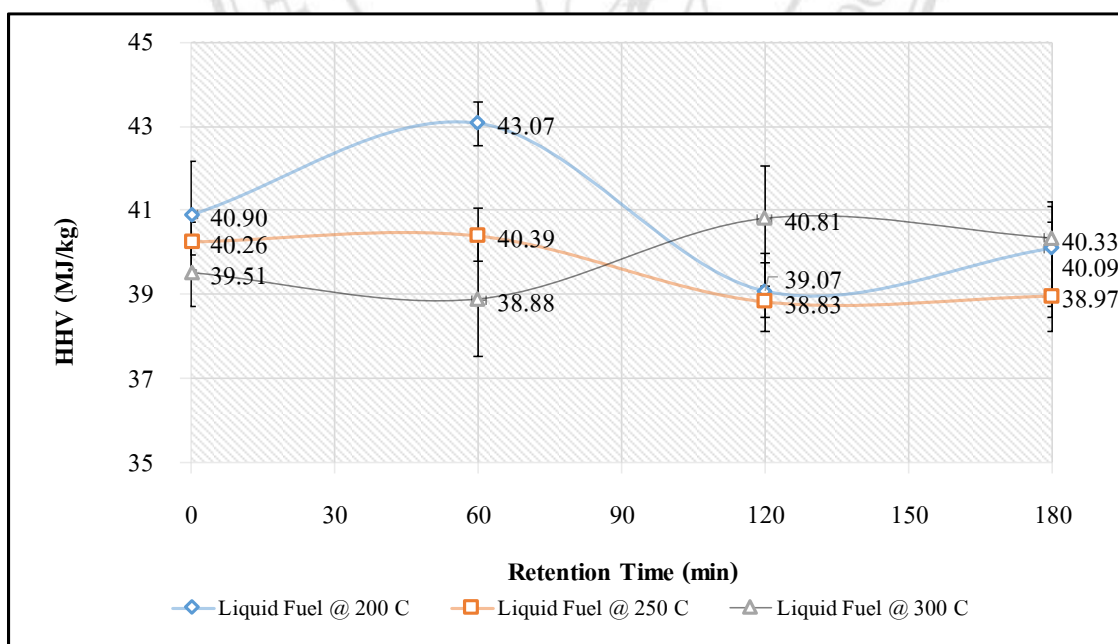
รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

จากผลการวิเคราะห์เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในแบบประมาณ พบว่า มีองค์ประกอบที่เป็นสารระเหยอยู่ประมาณร้อยละ 80.84 ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้การทำปฏิกิริยาเพื่อให้การได้มาซึ่งปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวสูงที่สุดที่ปริมาณร้อยละ 32.33 และ 27.65 ทั้งในแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ (200 °C) มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา โดย ณ สภาวะเงื่อนไขการทดลองดังกล่าว จะสามารถแยกสารระเหยออกจากของแข็ง และทำให้สารระเหยบางส่วนเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซได้เพียงเล็กน้อย อีกทั้งมีโครงสร้างบางส่วนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เปลี่ยนรูปไปเป็นของเหลว แต่ในทางกลับกันถ้าเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้มากยิ่งขึ้น จะ

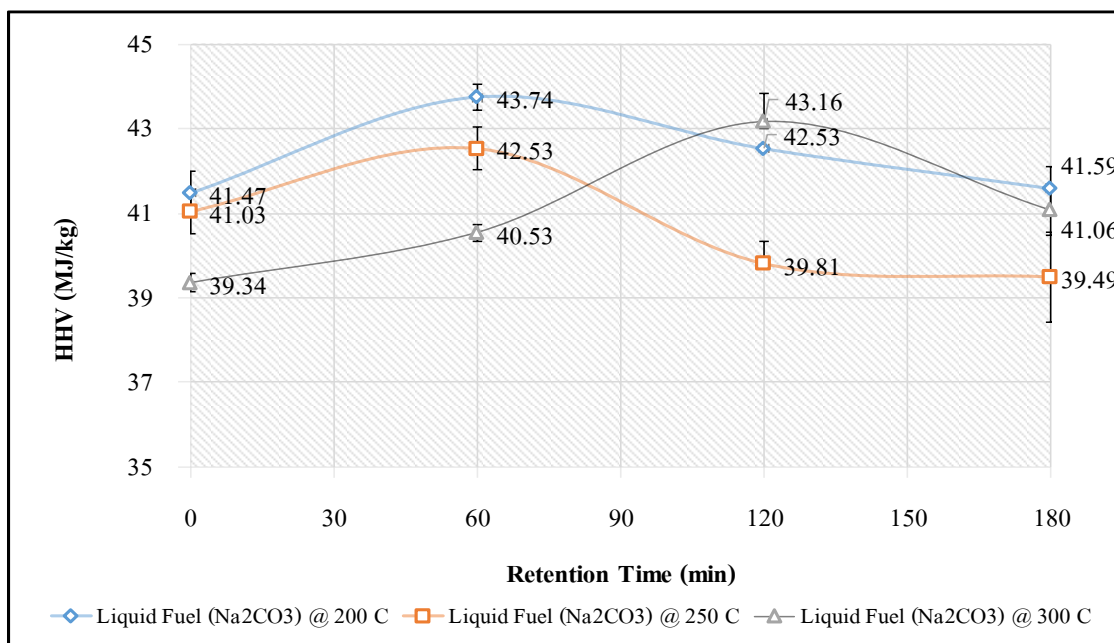
ส่งผลทำให้สารระเหยที่ถูกแยกออกจากส่วนที่เป็นของแข็งเปลี่ยนสถานะจากของเหลว กลายเป็นก๊าซเพิ่มมากยิ่งขึ้นจึงส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้ลดลงตามลำดับ [20] [61]

3.4 อุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว

ผลจากการทดสอบค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ในแต่ละสภาวะเงื่อนไขการทดลอง พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว มีผลโดยตรงต่อค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตจะได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวสูงสุดที่ 43.07 MJ/kg และ 43.74 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะมีค่าความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 38.83-43.07 MJ/kg (ดังรูปที่ 3-8) แต่ในกรณีที่เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตจะทำให้ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้เพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ 1-2 MJ/kg ในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองโดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 39.34-43.74 MJ/kg (ดังรูปที่ 3-9)



รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



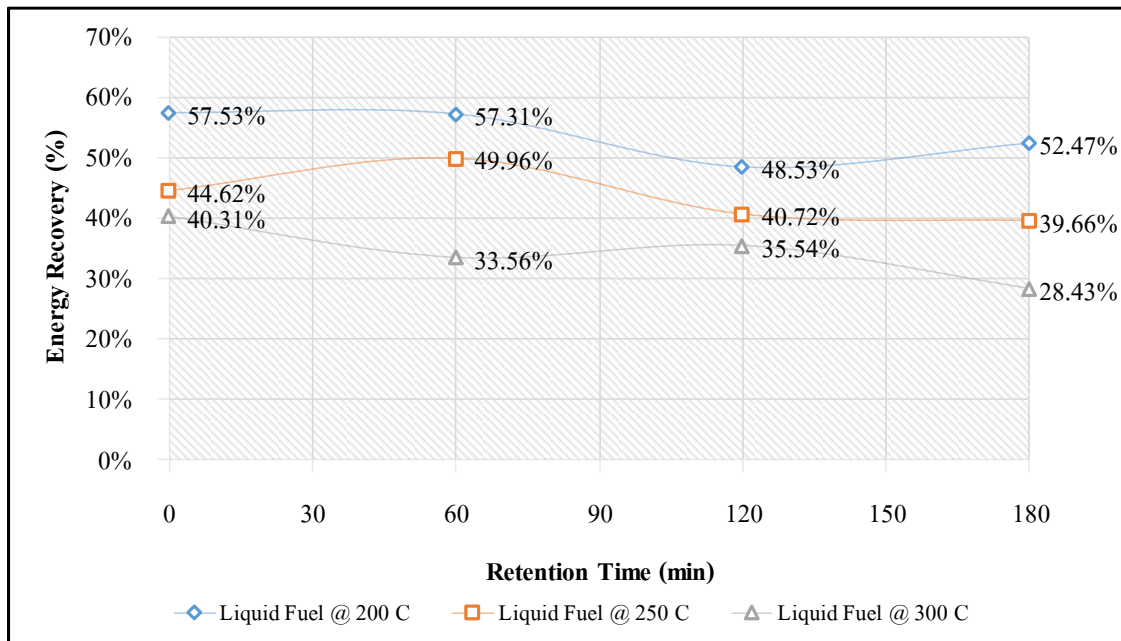
รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

ดังนั้นเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด คือ 43.74 MJ/kg ได้จากเงื่อนไขสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะช่วยเร่งปฏิกิริยาย่อยสลายโมเลกุลในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อาทิเช่น เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น ให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงจากนั้นจะเกิดกระบวนการเคมีต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม เช่น Dehydration Dehydrogenation Deoxygenation and Decarboxylation เป็นต้น ทำให้โมเลกุลต่างๆ เกิดการจัดเรียงโครงสร้างและควบแน่นเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจน เช่น คีโตน (Ketone) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acids) สารประกอบฟีนอล และอนุพันธ์ (Phenolic Compounds and Derivatives) และแอลเคนโซ่ยาว (Long-Chain Alkanes) ฯลฯ ดังนั้นเชื้อเพลิงเหลวที่ประกอบไปด้วยสารประกอบดังกล่าวจึงมีค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น [44] [62]

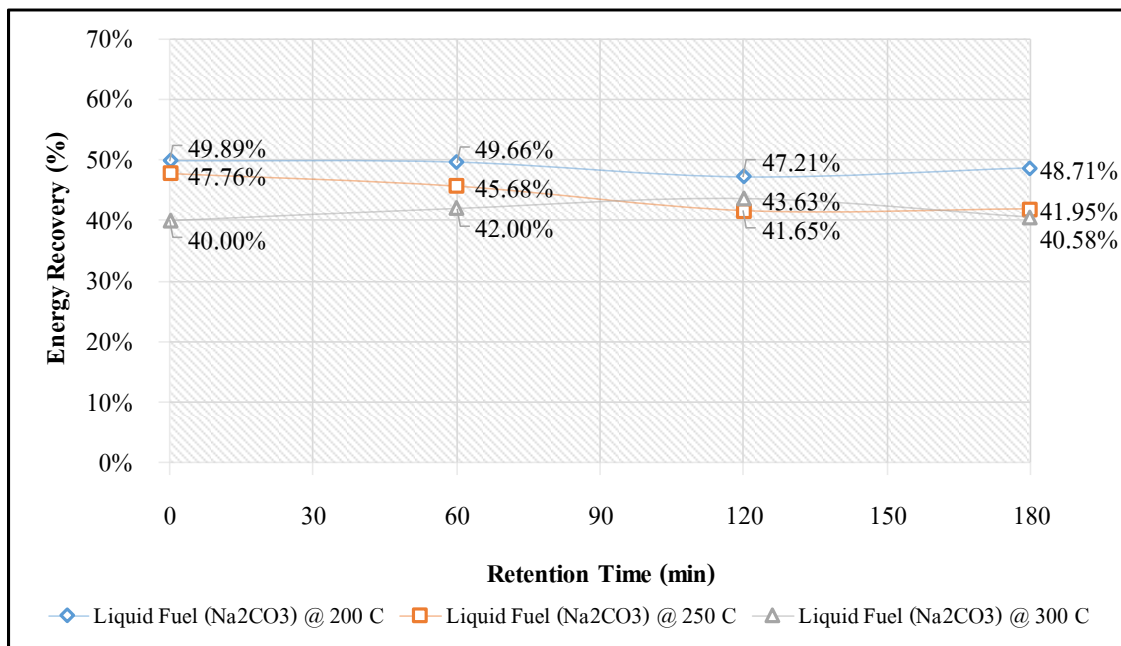
3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน

สำหรับประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะดำเนินการพิจารณาจากค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลวเป็นหลัก โดยเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการทดลองในรูปแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 38.88-43.07 MJ/kg แต่สำหรับในเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต

จะมีผลทำให้เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 39.34-43.74 MJ/kg ดังนั้นเมื่อนำค่าความร้อนสูงดังกล่าวมาพิจารณาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน พบว่า กรณีเงื่อนไขการทดลอง ณ สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา แบบที่ไม่ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงที่สุด 57.53% และ 49.89% ตามลำดับ



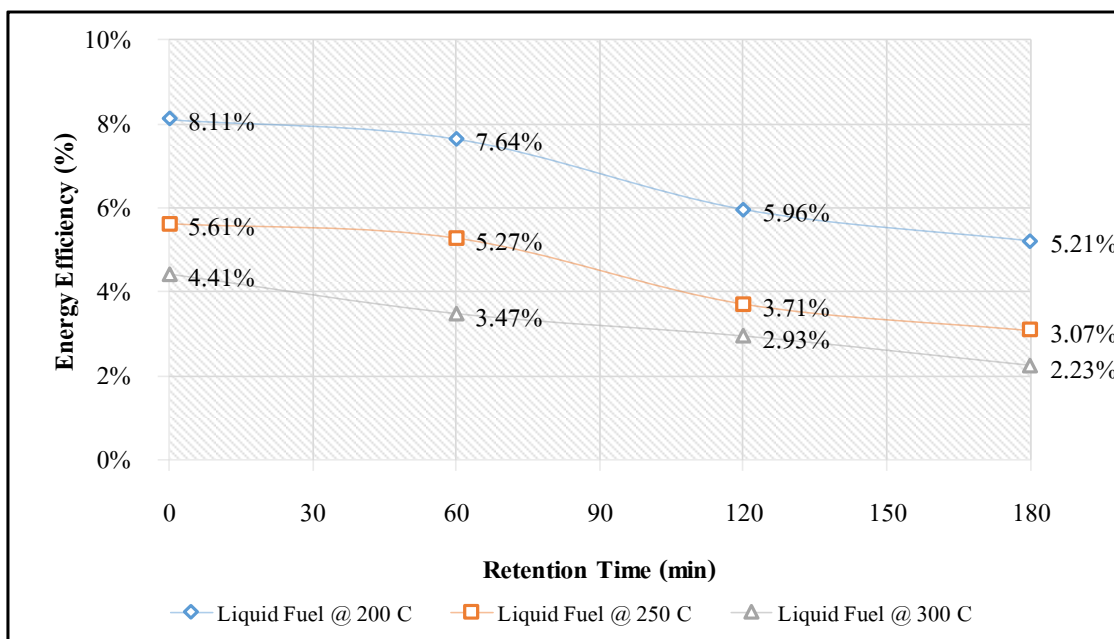
รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



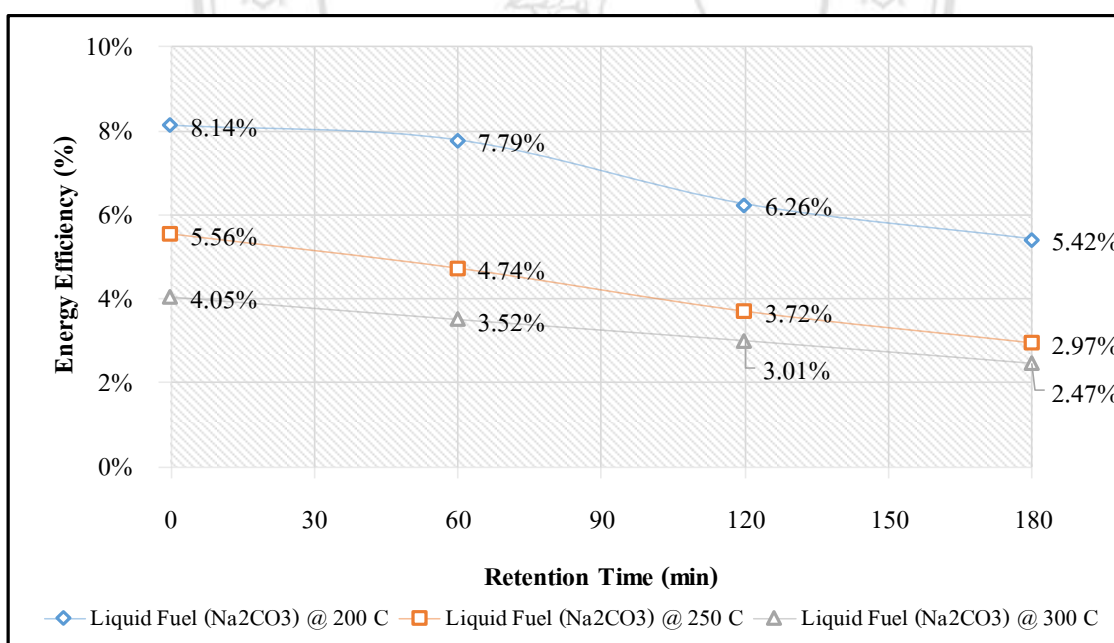
รูปที่ 3-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

3.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง รวมไปถึงปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ข้างต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะเห็นได้ว่าในเงื่อนไขการทดลองที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง ที่ได้จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด คือ ร้อยละ 8.11 ณ สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา ส่วนในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด คือ ร้อยละ 8.14 ณ สภาวะเงื่อนไขการทดลองเดียวกัน (ดังรูปที่ 3-12 และรูปที่ 3-13) ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในกรณีผลิตเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็งจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น และมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดต่ำลงตามลำดับ



รูปที่ 3-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



รูปที่ 3-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว

สำหรับผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ณ สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด คือ “การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา” ดังกล่าวรายละเอียดข้างต้น ทั้งนี้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวจะใช้ตัวอย่าง ณ สภาวะการทดลอง การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ตัวอย่าง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (5 wt.%) 1 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 2 ตัวอย่าง ไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.7.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวในแบบประมาณพบว่า เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการทดลองในแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าความร้อนสูงสุดประมาณ 41.47 MJ/kg ซึ่งมีความมากกว่าเชื้อเพลิงเหลวในแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เชื้อเพลิงเหลวดังกล่าวประกอบไปด้วย สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และขี้เถ้า ประมาณร้อยละ 93.82 4.07 1.97 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบเป็นสัดส่วนของส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustibles) คือ คาร์บอนคงตัว และสารระเหยได้ ต่อส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Incombustibles) คือ ความชื้น และขี้เถ้า จะมีค่าสัดส่วนประมาณร้อยละ 97.89 ต่อ 2.11

3.7.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวในแบบแยกธาตุ พบว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการทดลองในแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีองค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ในปริมาณร้อยละ 78.36 9.84 9.86 และ 0.31 ตามลำดับ โดยมีความมากกว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในปริมาณน้อยมาก (0.1%) ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์จะนำไปวิเคราะห์สูตรเคมีอย่างง่าย และคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ด้วยสูตรอย่างง่าย เช่น สูตรของดulong (Dulong formula) และสูตรของเดเมียบาส เป็นต้น ต่อไป

ตารางที่ 3-5 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายละเอียดการ วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว			หน่วยของ ผลการ วิเคราะห์	เครื่องมือ /วิธีการ วิเคราะห์
		จาก กระบวนการ การ Acetone Extraction	จากกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล			
			แบบไม่ใช้ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	แบบใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาโซเดียม คาร์บอเนต (5 wt.%)		
การวิเคราะห์แบบประมาณ						
1	ค่าความร้อนสูง	38.73	40.90	41.47	MJ/kg	Bomb calorimeter
2	สารระเหย	92.44	91.36	93.82	% dry basic	WI-RES- TGA-001
3	คาร์บอนคงตัว	2.98	7.40	4.07	% wt./wt.	
4	ความชื้น	4.35	0.95	1.97	% dry basic	
5	จีเถ้า	0.23	0.29	0.14	% wt./wt.	
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ						
1	คาร์บอน (C)	76.06	78.22	78.36	% wt./wt.	WI-RES-
2	ไฮโดรเจน (H)	9.45	9.79	9.84	% wt./wt.	CHNS-O-
3	ออกซิเจน (O)	9.55	9.80	9.86	% wt./wt.	001 and
4	ไนโตรเจน (N)	0.19	0.31	0.31	% wt./wt.	CHNS-O
5	ซัลเฟอร์ (S)	N/A	N/A	N/A	% wt./wt.	Analyzer

3.7.3 การวิเคราะห์สูตรเคมีอย่างง่ายของเชื้อเพลิงเหลว

จากการวิเคราะห์ในแบบแยกธาตุ และการคำนวณหาสูตรเคมีอย่างง่าย ของเชื้อเพลิงเหลวทั้ง 3 ชนิด ข้างต้นจะสามารถแสดงสูตรเคมีอย่างง่ายของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากจากกระบวนการ Acetone extraction คือ $\text{CH}_{1.842}\text{O}_{0.117}\text{N}_{0.003}$
- 2) เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ $\text{CH}_{1.909}\text{O}_{0.120}\text{N}_{0.004}$
- 3) เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (5 wt.%) คือ $\text{CH}_{1.918}\text{O}_{0.121}\text{N}_{0.004}$

3.7.4 การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

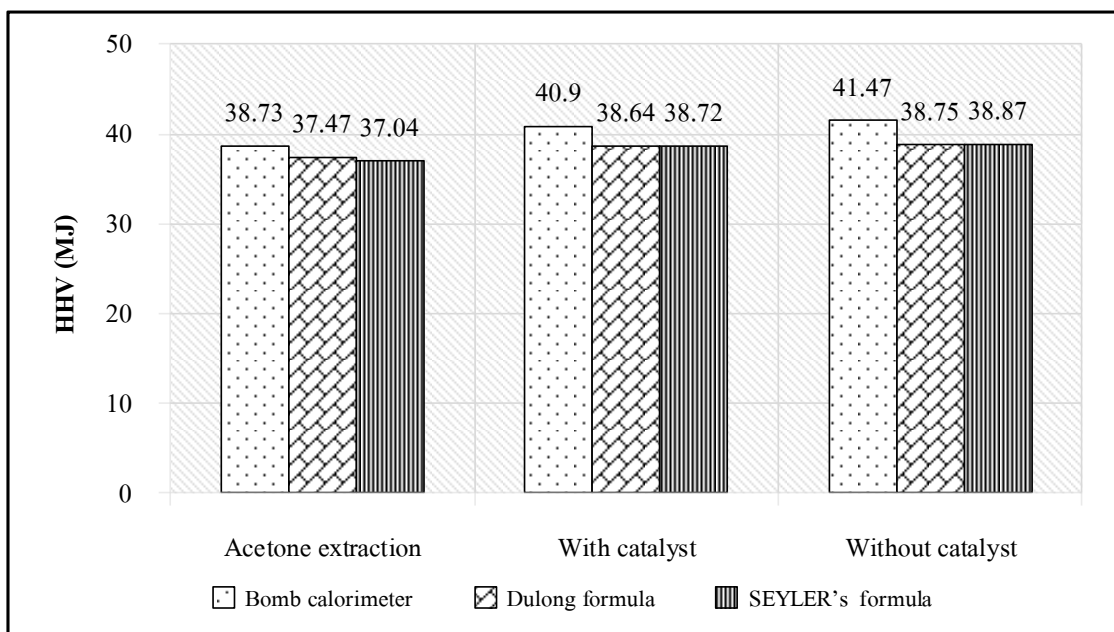
นอกจากการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า “บอมบ์แคลอรีมิเตอร์แบบอเดียติก” แล้วยังสามารถหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวได้จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุได้อีกแนวทางหนึ่ง กล่าวคือ การคำนวณหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจากการแทนค่าในสูตรของดulong และเดเมียบาส โดยค่าที่นำไปแทนในสูตรจะสามารถหาได้จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุที่ระบุค่าสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงเหลว และเกี่ยวข้องกับค่าในสูตร ดังแสดงผลของการคำนวณต่อไปนี้

- 1) สูตรของดulong

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 0.3383\text{C} + 1.422 (\text{H} - \text{O}/8)$$

- 2) สูตรของ SEYLER's formula

$$\text{Gross calorific value (cal/g)} = 123.9\text{C} + 388.1\text{H} + 0.25\text{O}^2 - 4269$$



รูปที่ 3-14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

จากผลการคำนวณข้างต้นแสดงให้เห็นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการใช้สูตรของ ดulong และ SEYLER's formula มีแนวโน้มค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งในกรณีที่ใช้ และไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้สามารถคำนวณร้อยละของค่าความแตกต่างจากการตรวจวัดด้วยบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ ได้เฉลี่ยประมาณ 3.81 5.43 และ 6.41 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการ ดังกล่าวค่อนข้างมีความยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายที่สูง โดยเฉพาะการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง เชื้อเพลิงเหลวในแบบแยกธาตุ

3.7.5 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง

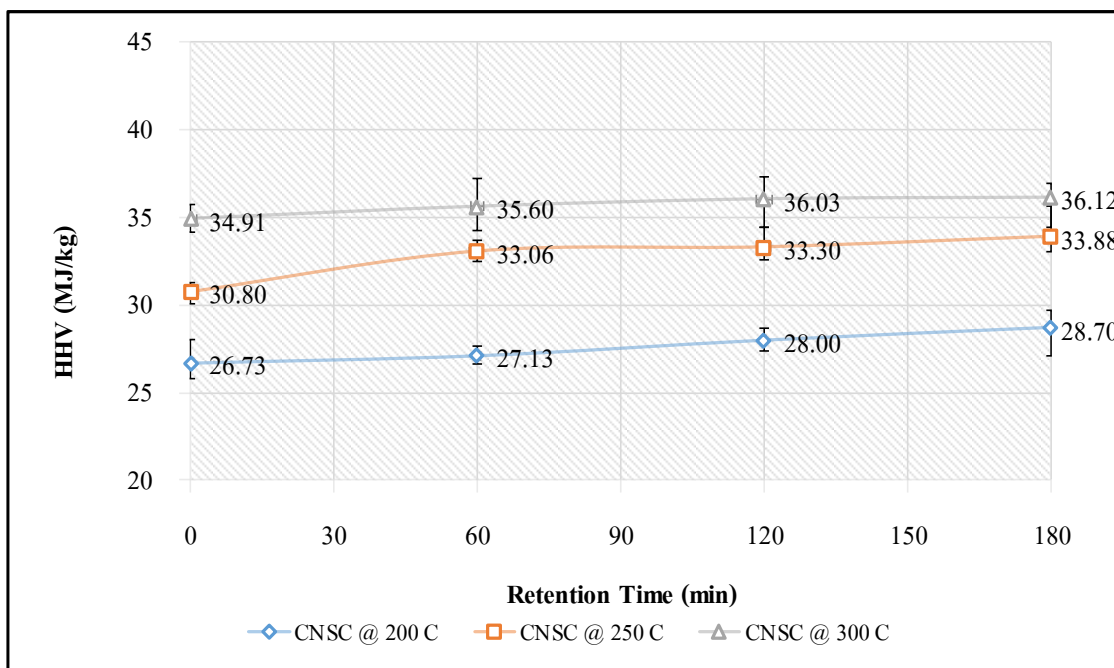
สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล พบว่า เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (5 wt.%) จะมีค่าความเป็นกรด (3.45 ± 0.01) น้อยกว่า หรือมีความเป็นด่างมากกว่า แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (3.30 ± 0.06) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นด่างร่วมทำปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง จึงส่งผลทำให้มีสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนตกค้าง และปะปนอยู่ในส่วนของเชื้อเพลิงเหลวดังกล่าว

ตารางที่ 3-6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จาก
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

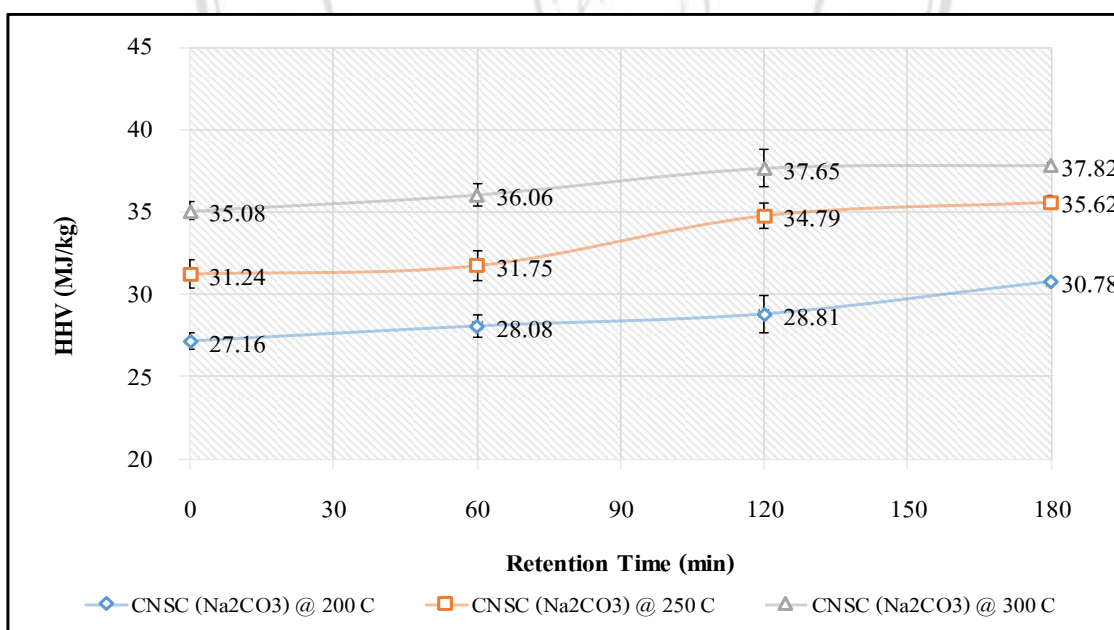
ลำดับ ที่	รายละเอียดการ วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว		
		จาก กระบวนการ Acetone extraction	จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	
			แบบไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมคาร์บอเนต (5 wt.%)
1	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	3.26 ± 0.12	3.30 ± 0.06	3.45 ± 0.01

3.8 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็ง

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงแข็ง หรือ CNSC จะดำเนินการวิเคราะห์ผลใน 2 ส่วน หลัก คือ 1. ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ เพื่อนำไปวิเคราะห์สมมูลมวลของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลต่อไป และ 2 การทดสอบค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์แบบอเดียบติก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งจากการผลทดสอบ พบว่า ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็งมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ทั้งในรูปแบบการทดลองที่ไม่ใช้ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต แต่ทั้งนี้ในการทดลองที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งที่สูงกว่าในรูปแบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงผลใน รูปที่ 3-15 และ รูปที่ 3-16 ณ สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 180 นาที ทั้งในแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตจะได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งสูงสุดที่ 36.12 MJ/kg และ 37.82 MJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 3-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



รูปที่ 3-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเทียบกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

3.9 การวิเคราะห์ก๊าซ

การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็น ก๊าซ จะดำเนินการตรวจวิเคราะห์เฉพาะ ตัวอย่างก๊าซที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้น เวลาทำปฏิกิริยา ทั้งในกรณีที่ใช่และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง รวมทั้งหมด 2 ตัวอย่าง โดย สามารถตรวจพบก๊าซออกซิเจน (O₂) ในไนโตรเจน (N₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณ 2.40 33.00 0.15 และ 4.00 % โมล ตามลำดับ ในก๊าซที่เกิดขึ้น จากกรณีที่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต และในส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจากกรณีที่ไม่ใช่ตัวเร่ง ปฏิกิริยาจะมีปริมาณน้อยกว่าเล็กน้อย ยกเว้นก๊าซออกซิเจนจะพบในปริมาณที่มากกว่าประมาณ 2.3 % โมล ทั้งนี้ก๊าซตัวอย่างทั้ง 2 กรณี ไม่พบว่ามีองค์ประกอบของ ก๊าซมีเทน (CH₄) และไฮโดรเจน (H₂) เป็นส่วนผสมอยู่ในก๊าซตัวอย่าง ดังแสดงรายละเอียดของผลการตรวจวิเคราะห์ต่อไปนี้

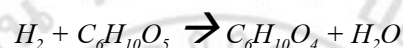
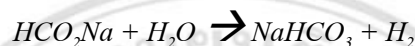
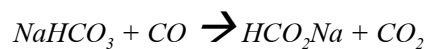
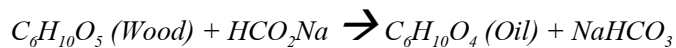
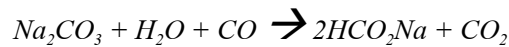
ตารางที่ 3-7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายละเอียดการวิเคราะห์	ตัวอย่างก๊าซที่ ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (% โมล)	ตัวอย่างก๊าซที่ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม คาร์บอเนต (5 wt.%) (% โมล)
1	ออกซิเจน (O ₂)	4.70	2.40
2	ไนโตรเจน (N ₂)	31.00	33.00
3	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.11	0.15
4	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	2.30	4.00
5	มีเทน (CH ₄)	N/A	N/A
6	ไฮโดรเจน (H ₂)	N/A	N/A

จากการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลไกที่ซับซ้อนของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิกวิด แฟรกชัน พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะทำให้เกิดสารประกอบฟอร์มเท (Formate) จากคาร์บอเนต การดีไฮเดรชันของ Vicinal Hydroxyl Groups ในเซลลูโลสไปเป็น สารประกอบคาร์บอนิลด้วยวิธีการอินอล³ (Enols) การลดรูปของกลุ่มคาร์บอนิลไปเป็นแอลกอฮอล์

³ Enols (also known as alkenols) are alkenes with a hydroxyl group affixed to one of the carbon atoms composing the double bond.

ด้วยฟอร์เมท และน้ำ และการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของฟอร์เมท [43] [63] (Appell et al., 1975) ดังแสดงปฏิกิริยาต่อไปนี้



จากผลการทดสอบคุณสมบัติของก๊าซ และสมการเคมีข้างต้น พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาดังกล่าวโดยตรง ดังแสดงผลการทดลองตารางที่ 3-7 จะเห็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าจาก 2.30 % โมล ในกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็น 4.00 % โมล ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต

3.10 การวิเคราะห์สารประกอบของน้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำเสีย (Waste water) จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะประกอบไปด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ร่วมกับสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ โดยในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะมีปริมาณน้ำเสีย และสารประกอบอินทรีย์ที่ได้แตกต่างกันไป ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงคัดเลือกตัวอย่างน้ำเสียที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ที่เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งหมด 2 ตัวอย่าง มาตรวจวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารละลาย และธาตุอาหารต่างๆ ด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ พบว่า น้ำเสียที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณของธาตุอาหารหลักหรือ ธาตุปุ๋ย ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) ที่มากกว่าน้ำเสียที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 2 เท่า (ตารางที่ 3-8) แต่น้ำเสียที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความเป็นกลางมากกว่า กล่าวคือ มีค่า pH = 7.06 ทั้งนี้ในกรณีน้ำเสียที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความเป็นกรดที่มากกว่า (pH = 3.38) เป็นผลมาจากในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลได้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งทำให้น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (pH = 7.00) ทำปฏิกิริยากับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และเกิดการย่อยสลายพร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลภายในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อีกทั้งทำให้สารระเหยต่างๆ ถูกทำละลายปะปนอยู่ในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ไม่มีสี (ในตอนเริ่มต้น) เปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนหรือสี

เหลืองเข้มตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทดลอง การใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา รวมไปถึงระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับอากาศภายนอกถึงปฏิกิริยา ดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
ในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ

สำหรับน้ำเสียในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะมีธาตุโซเดียม (Na) ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้หมดละลายอยู่ในน้ำเสียปริมาณที่สูง ถึง 1,008.29 mg/L ซึ่งเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรอาจจะส่งผลกระทบต่อทำให้ดินมีเกลือของโซเดียมผสมอยู่ ซึ่งถ้ามีในปริมาณที่มากเกินไปอาจจะส่งผลกระทบต่อทำให้การเจริญเติบโตของพืชไม่เป็นไปตามปกติ หรือเกิดสภาวะที่เรียกว่า ดินเกลือ (Salt-Affected soil) ได้

ตารางที่ 3-8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายการวิเคราะห์	หน่วย	ตัวอย่างน้ำเสีย	
			ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมคาร์บอเนต
1	pH	-	3.38	7.06
2	Electrical Conductivity	mS/cm	1.54	7.15
3	Total Nitrogen (N)	%	0.02	0.01
4	Phosphorus (P)	mg/L	31.67	15.00
5	Potassium (K)		318.26	171.99

ตารางที่ 3-8 (ต่อ) การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายการวิเคราะห์	หน่วย	ตัวอย่างน้ำเสีย	
			ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมคาร์บอเนต
6	Sodium (Na)	mg/L	37.29	1,008.29
7	Calcium (Ca)		14.90	12.15
8	Magnesium (Mg)		34.22	14.14
9	Sulfur (S)		29.04	19.39
10	Iron (Fe)		<0.5	0.34
11	Manganese (Mn)		1.98	0.90
12	Copper (Cu)		0.79	0.94
13	Zinc (Zn)		0.47	0.32
14	Boron (B)		0.28	0.48

3.11 การวิเคราะห์สมดุลมวลของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

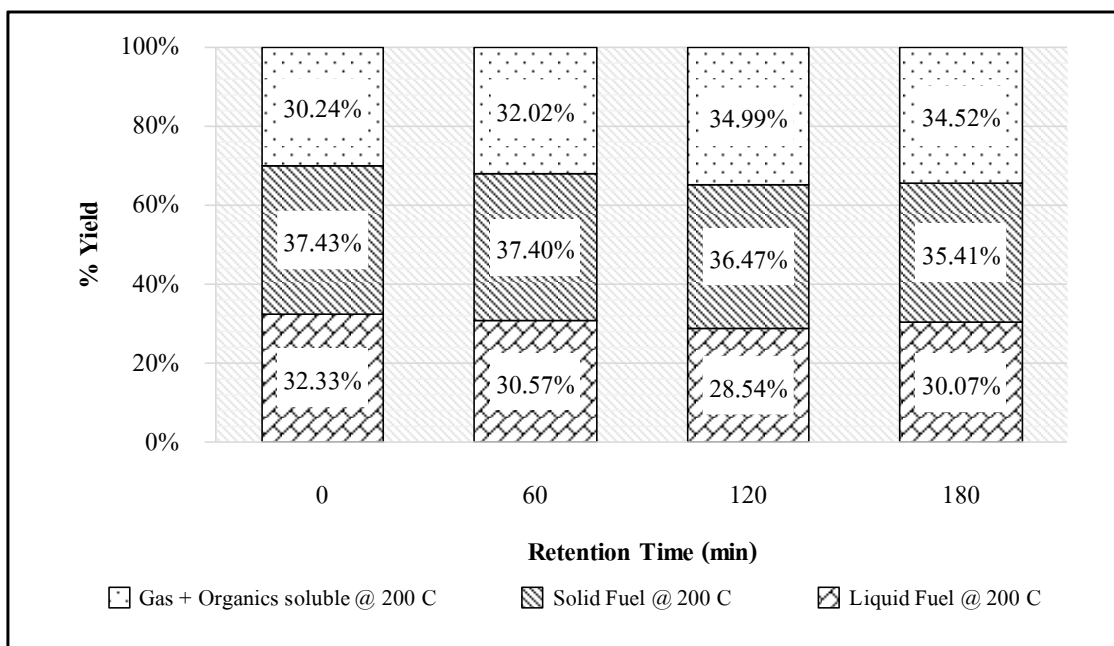
ในกระบวนการทดลองแต่ละเงื่อนไข จะเริ่มต้นด้วยการจัดเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น 4 ชนิด คือ 1. เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ประมาณ 20 กรัม 2. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ ประมาณ 200 กรัม (200 ml) 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ประมาณ 1 กรัม และ 4. แก๊สไนโตรเจน (น้ำหนักน้อยมากเมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น และเป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สอื่นๆ ขณะทำการทดลอง) ทำปฏิกิริยากันภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง จากนั้นจะได้ผลผลิตที่เป็นผลิตภัณฑ์หลัก 4 ชนิด คือ 1. เชื้อเพลิงเหลว 2. เชื้อเพลิงแข็ง 3. แก๊ส และ 4. น้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายผสมอยู่ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองนั้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันตามแต่ละเงื่อนไขในการทดลอง ดังนั้นในการพิจารณาสมดุลมวลจะดำเนินการตรวจวัดเฉพาะปริมาณของผลิตภัณฑ์หลักอยู่ 2 ชนิด คือ 1. เชื้อเพลิงเหลว และ 2. เชื้อเพลิงแข็ง ด้วยกระบวนการชั่งน้ำหนัก ทั้งนี้ในส่วน ของ แก๊ส และน้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายผสมอยู่ จะสามารถหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักรวมก่อน กับหลังการทดลอง



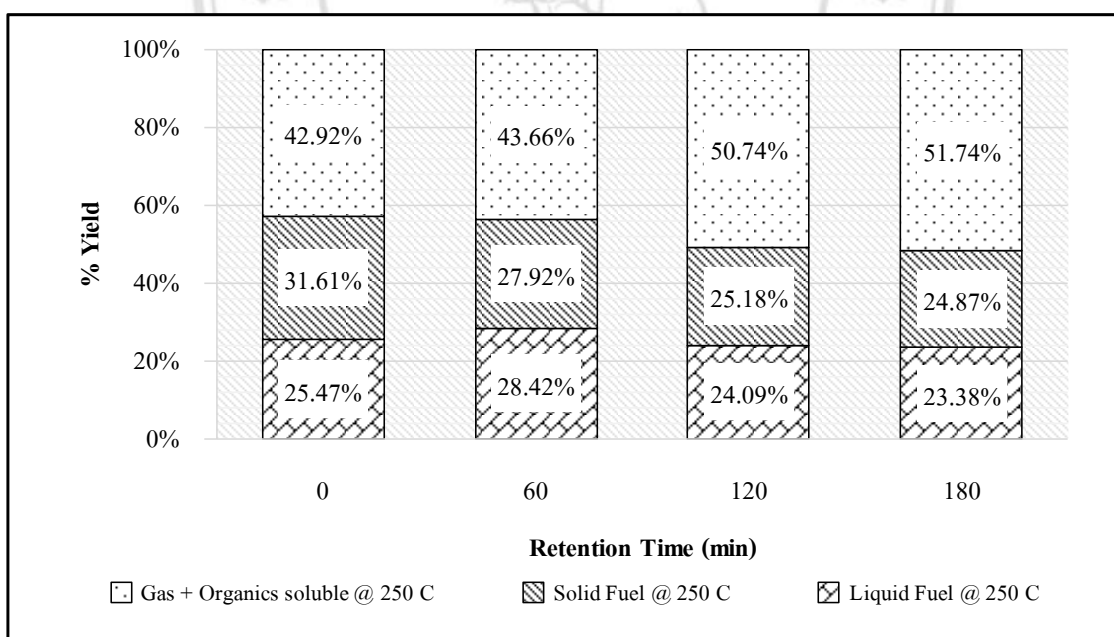
รูปที่ 3-18 วัตถุดิบตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง

จากผลการทดลองในทั้ง 2 เงื่อนไข (กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) พบว่าปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ จะมีปริมาณลดน้อยลงเมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 3-19 ถึง รูปที่ 3-24) แต่ในทางตรงกันข้ามปริมาณร้อยละของ ก๊าซ และน้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายผสมอยู่จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้รับพลังงานความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งภายในถังปฏิกรณ์แรงดันสูงได้เกิดกระบวนการทางเคมีต่างๆ กล่าวคือ กระบวนการไฮโดรไลซิส และ กระบวนการรีพอลิเมอร์ไลเซชัน⁴ โดยในตอนเริ่มต้นองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะถูกย่อยสลาย และลดขนาดของโมเลกุลให้เล็กลง ในลำดับต่อมาโมเลกุลขนาดเล็กก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่ภายใต้อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม [64] ดังนั้นองค์ประกอบและปริมาณของ เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซ และน้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายผสมอยู่ จึงมีค่าที่แตกต่างกันออกไปตามแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

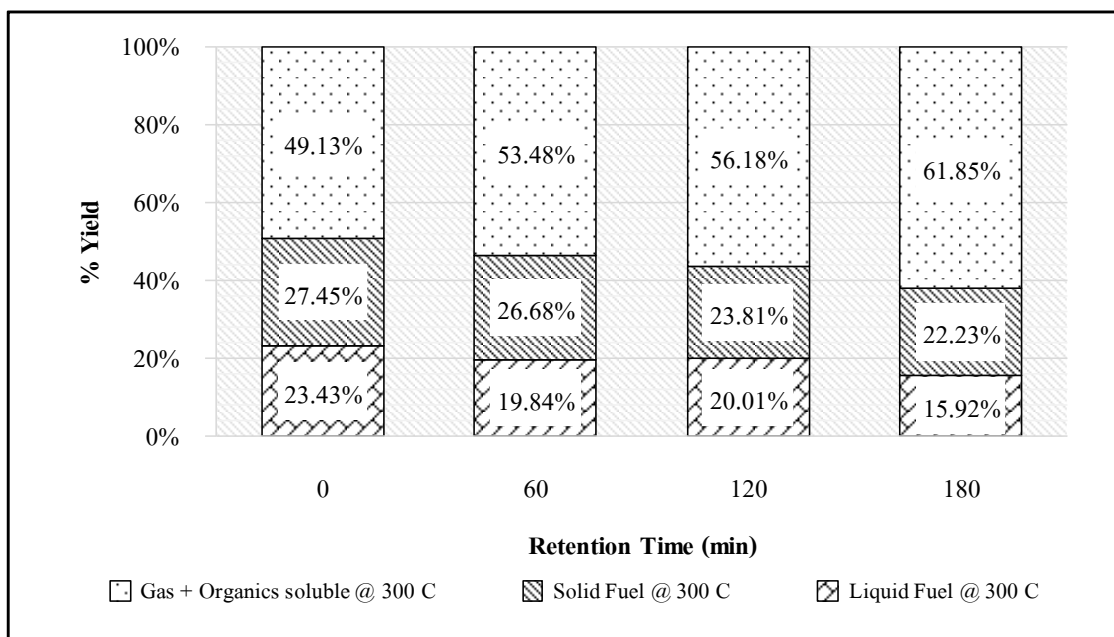
⁴รีพอลิเมอร์ไลเซชัน (Repolymerization) คือ กระบวนการทางเคมีที่สารชนิดเดียวกันหลายโมเลกุล เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น



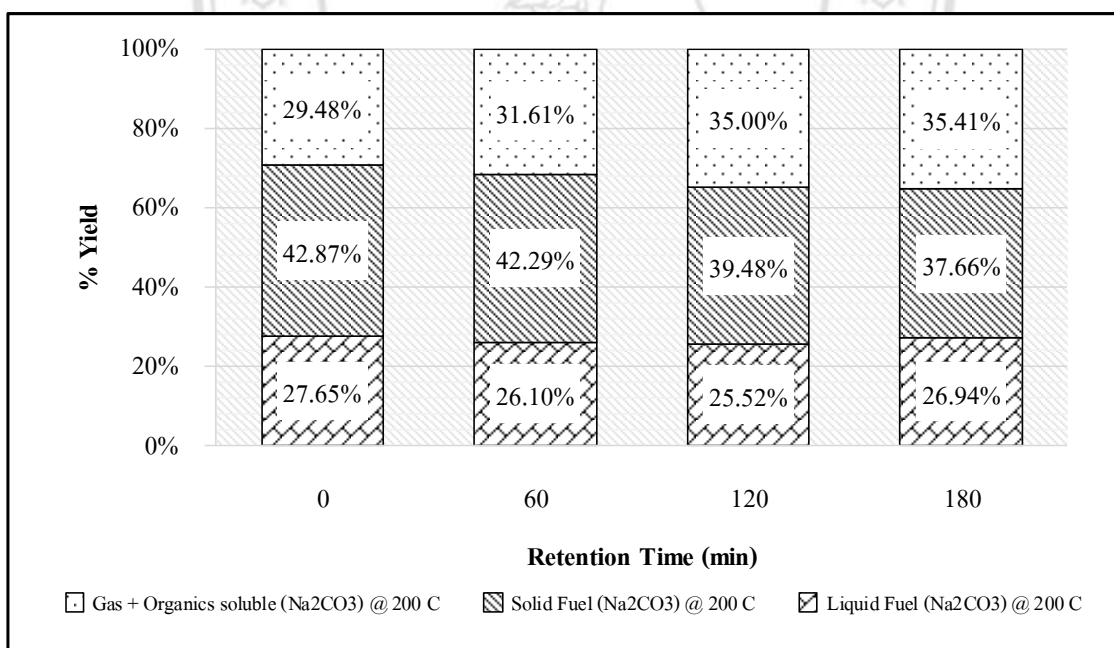
รูปที่ 3-19 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C
(แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



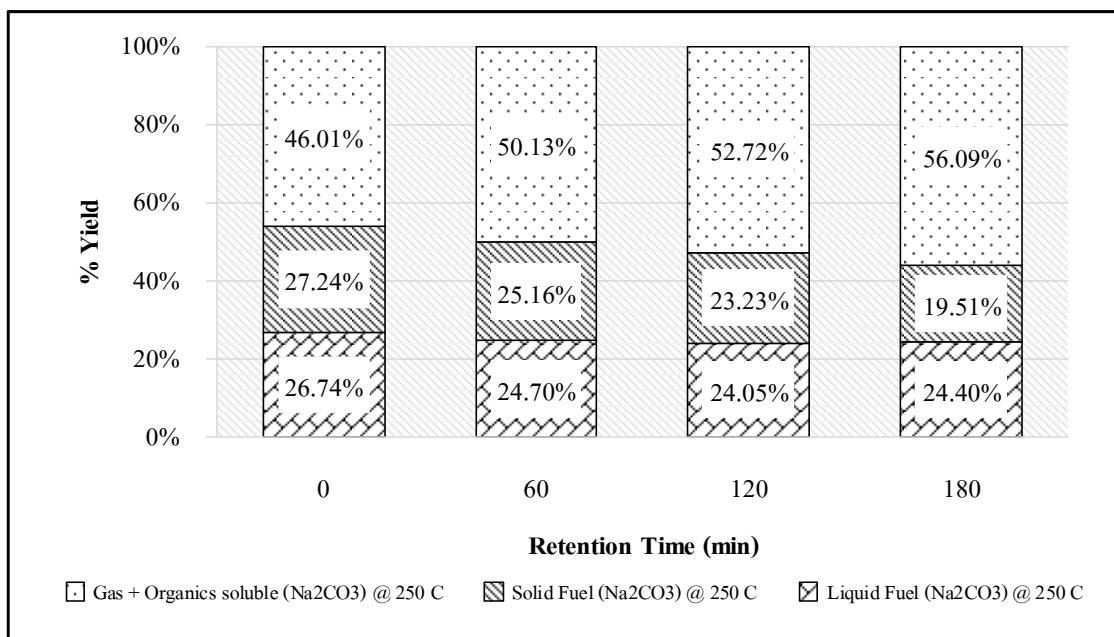
รูปที่ 3-20 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C
(แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



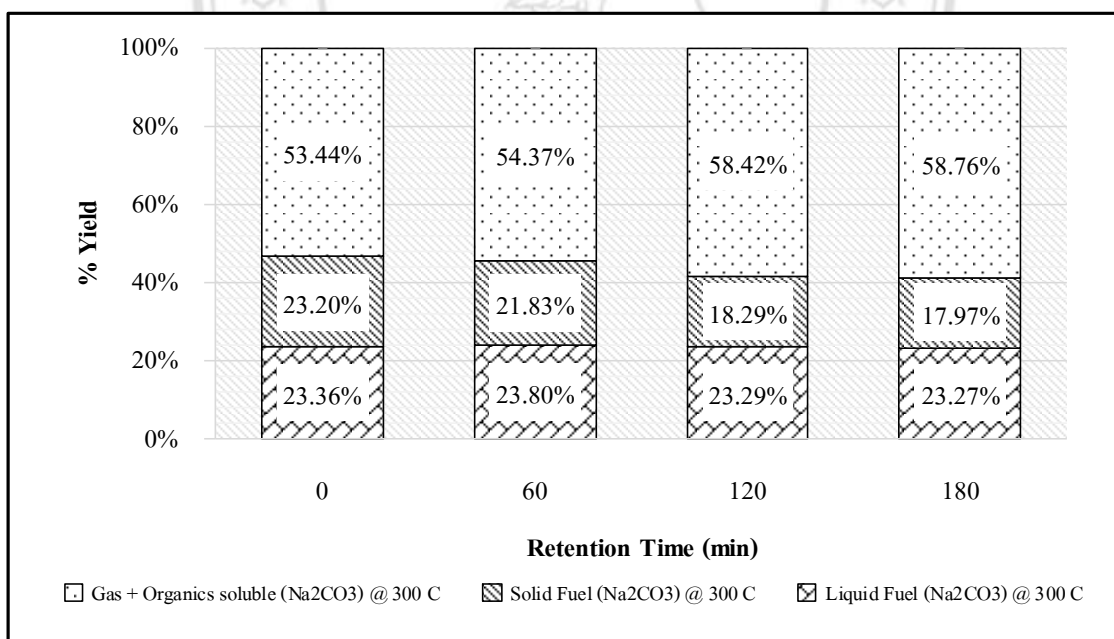
รูปที่ 3-21 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C
(แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



รูปที่ 3-22 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C
(แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)



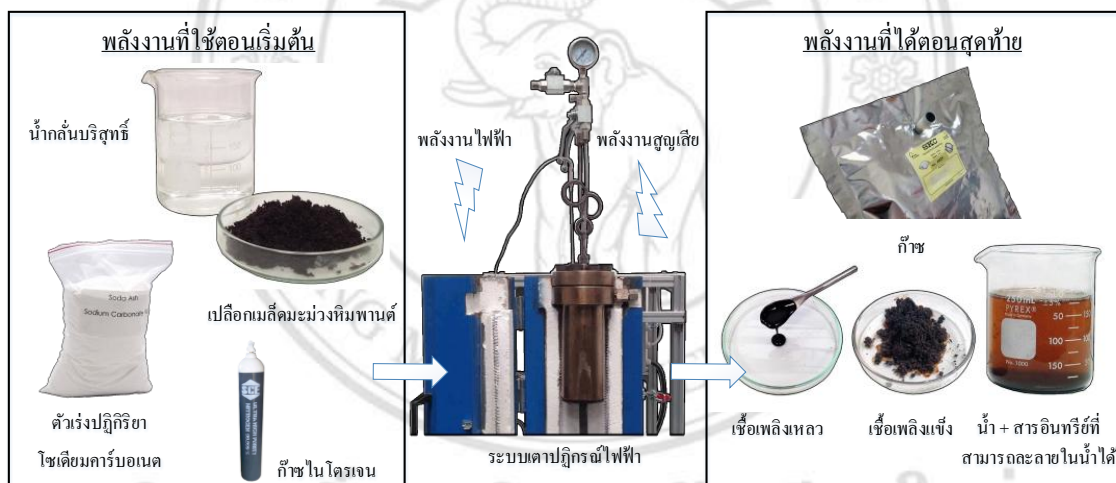
รูปที่ 3-23 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C
(แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)



รูปที่ 3-24 สมดุลมวลในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C
(แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

3.12 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

สำหรับในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะพิจารณาจากค่าที่ได้จากการตรวจวัด ประกอบกับการคำนวณด้วยค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไข ดังนั้นสมดุลพลังงานที่น่าเสนอจึงเป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยพลังงานที่ใช้เริ่มต้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1. พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และ 2. พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ ทั้งนี้ในกระบวนการดังกล่าวจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกไปสู่สิ่งแวดล้อม ผ่านการนำ การพา การแผ่รังสี และการสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังปฏิกรณ์ไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิถึงปฏิกรณ์ความดันสูงให้เข้าสู่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทดลองจะได้ผลิตภัณฑ์หลักอยู่ 3 สถานะ ที่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงได้ซึ่งก็คือ 1. เชื้อเพลิงเหลว 2. เชื้อเพลิงแข็ง และ 3. ก๊าซ ดังรายละเอียดการวิเคราะห์ด้านพลังงานต่อไปนี้



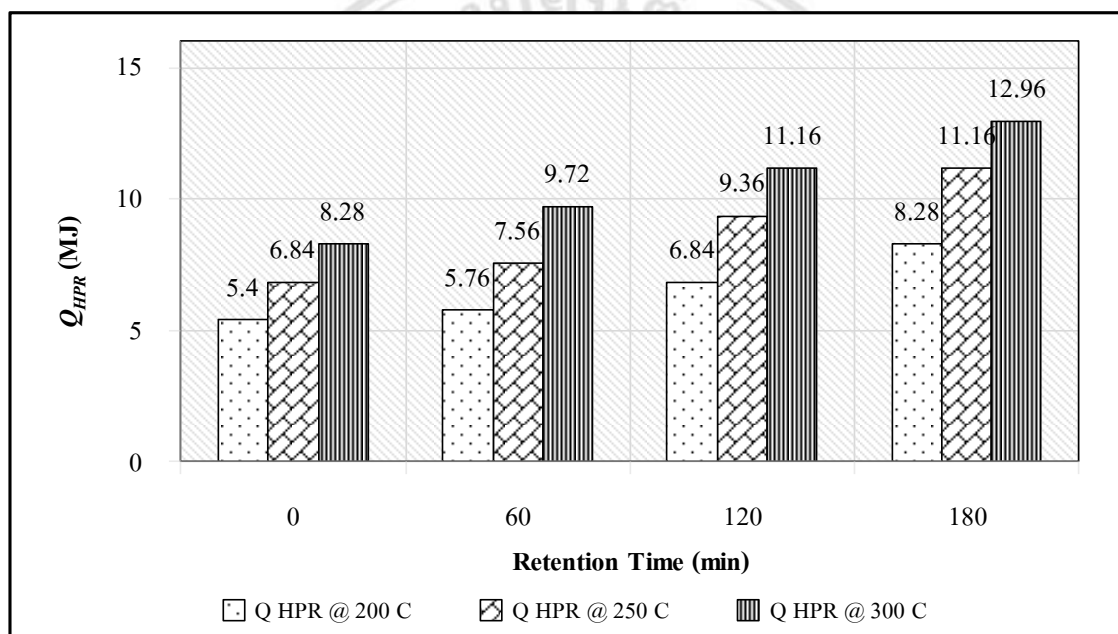
รูปที่ 3-25 พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น และพลังงานที่ได้ตอนสุดท้ายจากกระบวนการทดลอง

3.12.1 พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น

พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้นการทดลอง ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า และพลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นหลัก แต่สำหรับพลังงานภายในอื่นๆ อันได้แก่พลังงานภายในจากน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ก๊าซไนโตรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะมีปริมาณพลังงานที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานส่วนใหญ่ที่ได้กล่าวข้างต้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) พลังงานจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

จากผลการตรวจวัดปริมาณพลังงานที่เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าต้องใช้เพิ่มอุณหภูมิน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์แรงดันสูงจากอุณหภูมิห้องที่ 25 °C ไปจนถึง ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 250 และ 300 °C จะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 1.50 1.90 และ 2.30 kWh หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนประมาณ 5.40 6.84 และ 8.64 MJ ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 60 120 และ 180 นาที



รูปที่ 3-26 ค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง

2) พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

สำหรับพลังงานที่ได้จากวัตถุดิบตั้งต้นจะสามารถหาได้จากการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปผ่านกระบวนการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องบอร์นแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งพบว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าความร้อนสูงประมาณ 22.98 MJ/kg

3) น้ำกลั่นบริสุทธิ์

น้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงปริมาณ 200 มิลลิลิตร (200 กรัม) จะอยู่ในสถานะของเหลวอัดตัว (Compress liquid) และมีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนดำเนินการทดลองประมาณ 25 °C มีพลังงานภายใน (u) 103.14 kJ/kg หรือ 0.02 MJ จากนั้นจะ

ได้รับพลังงานความร้อนจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ผ่านถึงปฏิกรณ์ความดันสูง จนถึง อุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 250 และ 300 °C

4) ก๊าซไนโตรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต

สำหรับค่าพลังงานภายในของก๊าซไนโตรเจน (6,190 kJ/kmol ที่อุณหภูมิ 25 °C) และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต มีค่าน้อยมาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพลังงานหลักจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า และพลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยเฉพาะพลังงานภายในจากก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับก๊าซอื่น จึงมีค่าพลังงานในตอนเริ่มต้น เท่ากับตอนสุดท้ายของการศึกษาวิจัย ดังนั้นในการวิเคราะห์ครั้งนี้จึงไม่นำค่าพลังงานภายในของก๊าซไนโตรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต มาวิเคราะห์ร่วมกับสมดุลพลังงานดังกล่าว

3.12.2 พลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย

พลังงานที่ได้ตอนสุดท้ายของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะอยู่ในรูปของพลังงานในผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนก๊าซ น้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ จะมีพลังงานอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์หลักข้างต้น ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1) เชื้อเพลิงเหลว

ผลิตภัณฑ์หลักที่งานวิจัยครั้งนี้ได้ให้ความสำคัญคือ เชื้อเพลิงเหลว โดยที่เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ส่วนใหญ่จะมีค่าความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 38.83-43.07 MJ/kg สำหรับการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และอยู่ในช่วงประมาณ 39.34-43.74 MJ/kg ในกรณีที่เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองจะมีผลทำให้เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูงที่เพิ่มขึ้น

2) เชื้อเพลิงแข็ง

ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง หรือที่เรียกว่า ถ่านชีวภาพ (Bio char) จะอยู่ในช่วงประมาณ 26.73-36.12 MJ/kg สำหรับการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และอยู่ในช่วงประมาณ 27.16-37.82 MJ/kg ในกรณีที่เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ทั้งนี้ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเงื่อนไขการทดลอง จะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงแข็งมีค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น เปรียบเช่นเดียวกันกับในกรณีเชื้อเพลิงเหลว

3) ก๊าซ

สำหรับก๊าซที่ได้จากกระบวนการทดลองจะมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ได้ และจากผลการวิเคราะห์ก๊าซพบว่า องค์ประกอบของก๊าซส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซไนโตรเจนประมาณร้อยละ 31 และ 33 โดยโมล ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะก๊าซไนโตรเจนเป็นหลัก ณ ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง 25°C จะพบว่าก๊าซไนโตรเจนมีค่าพลังงานภายใน $6,190\text{ kJ/kmol}$ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหลว หรือเชื้อเพลิงแข็ง แล้วจะพบได้ว่าค่าพลังงานภายในของก๊าซไนโตรเจนดังกล่าวมีค่าที่น้อยมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานครั้งนี้ จะนำค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซที่เกิดขึ้นไปรวมกับส่วนของพลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้ต่อไป

4) น้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้

น้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ จากกระบวนการทดลองที่อยู่ในสถานะของเหลวอิมัลชัน อุณหภูมิ 25°C ณ ความดันบรรยากาศ จะมีพลังงานภายในประมาณ (u) 104.86 kJ/kg ซึ่งการประเมินค่าพลังงานภายในดังกล่าวข้างต้น เป็นการเปรียบเทียบค่าจากค่าพลังงานภายในจากน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ณ สภาวะเดียวกัน ทั้งนี้ปริมาณค่าพลังงานภายในของผลิตภัณฑ์ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะมีค่าที่แตกต่างกันโดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นหลัก

3.12.3 พลังงานสูญเสีย

การสูญเสียพลังงานในการทดลองแต่ละเงื่อนไข จะมีอยู่หลากหลายส่วน อันได้แก่ พลังงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะน้ำกลั่นบริสุทธิ์จากของเหลวอัดตัวไปเป็นของผสมอิมัลชัน พลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง และการสูญเสียความร้อนรวมในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ทั้งนี้การสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) พลังงานในการเปลี่ยนสถานะน้ำกลั่นบริสุทธิ์จากของเหลวอัดตัวไปเป็นของผสมอิมัลชัน

จากผลการวิเคราะห์พลังงานที่ให้แก่น้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่า การให้พลังงานแก่น้ำกลั่นบริสุทธิ์จากอุณหภูมิห้องที่ 25°C ไปจนถึง ณ อุณหภูมิที่ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300°C จะต้องใช้พลังงานประมาณ $0.16\text{ }0.22$ และ 0.29 MJ ตามลำดับ ณ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลา

ในการทำปฏิกิริยาจาก 60 120 และ 180 นาที่ อันเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานความร้อนในการควบคุมสภาวะดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น

ในทางกลับกันเมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นแล้ว จะดำเนินการลดอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ความดันสูงให้เข้าสู่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ดังนั้นน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในก็จะเปลี่ยนสถานะจากของผสมอิมัลชัน กลับมาอยู่ในสถานะของเหลวอัดตัวที่คล้ายกับสถานะตอนเริ่มต้นทำการทดลอง พร้อมกับการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ได้รับเข้าไปในตอนเริ่มต้นออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานความร้อนดังกล่าวก็ถือว่าเป็นพลังงานสูญเสียอีกรูปแบบที่เกิดขึ้นจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้

2) พลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง

พลังงานความร้อนที่ถังปฏิกรณ์ความดันสูง (Q_{HPR}) ต้องการเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องที่ 25 °C ไป ถึง ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200 250 และ 300 °C จะต้องใช้พลังงานความร้อนประมาณ 1.98 2.55 และ 3.12 MJ ตามลำดับ ซึ่งพลังงานความร้อนดังกล่าว จะถูกถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมในปริมาณที่เท่ากับพลังงานความร้อนที่ได้รับไปในตอนเริ่มต้น ทั้งนี้พลังงานดังกล่าวจะเป็นพลังงานสูญเสีย ในรูปแบบการนำ และการพาความร้อนเป็นหลัก

3) การสูญเสียความร้อนรวมในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

จากผลการทดลองทั้งหมดประมาณ 144 ตัวอย่าง และการวิเคราะห์ผล พบว่า พลังงานที่ใช้ในการทดลองของที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกันจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงนำค่าที่ได้จากการตรวจวัด และบันทึกผลรายละเอียดต่างๆ อาทิเช่น พลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง เป็นต้น มาประเมินหาค่าเฉลี่ยจากนั้นจึงนำค่าที่ได้ดังกล่าวไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียความร้อนรวมในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวจะแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขในการทดลองที่สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์สมดุลพลังงานได้ต่อไป

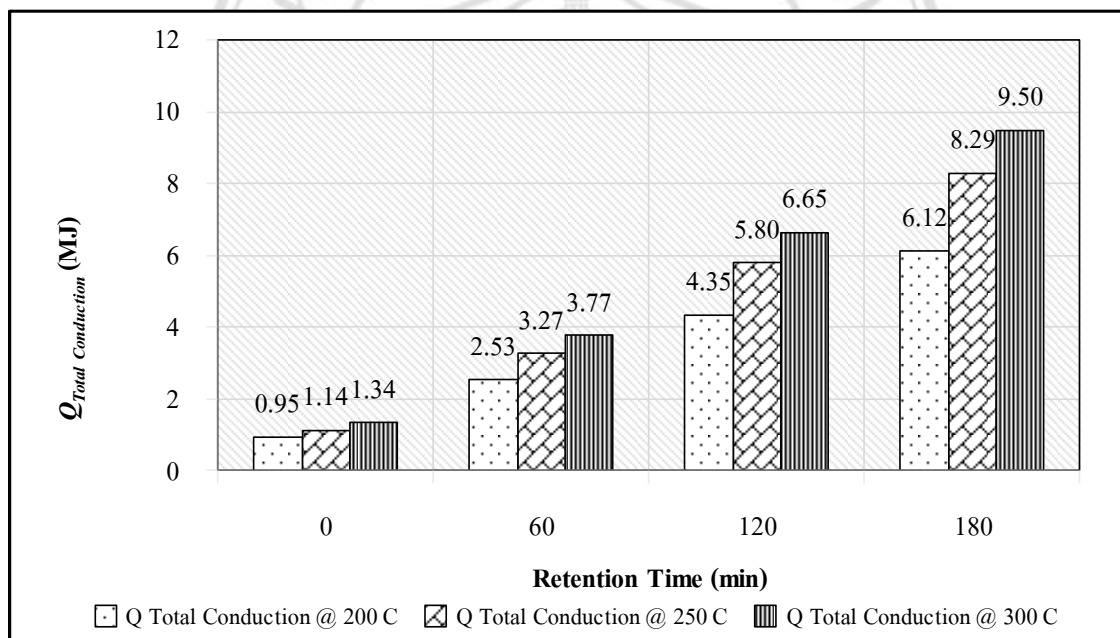
จากรูปแบบการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนหนึ่งมิติที่สภาวะคงที่ มีแหล่งผลิตความร้อนเกิดขึ้นในตัวกลางที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก และอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตามแนวโน้มของทรงกระบอก จะพบว่า การสูญเสียความร้อนหลักมาจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้ามากที่สุด ทั้งนี้สามารถพิจารณาค่าการสูญเสียความร้อนรวมในรูปแบบต่างๆ ได้ดังสมการ และผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

$$Q_{Total\ Conduction} = Q_{Total\ Convection} + Q_{Total\ Radiation} + Q_{Total\ Absorption}$$

3.1) การนำความร้อน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า การสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยมีการสูญเสียจากการนำความร้อนมากที่สุด คือ 9.50 MJ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C ระยะเวลา 180 นาที ดังแสดงการวิเคราะห์ผลต่อไปนี้

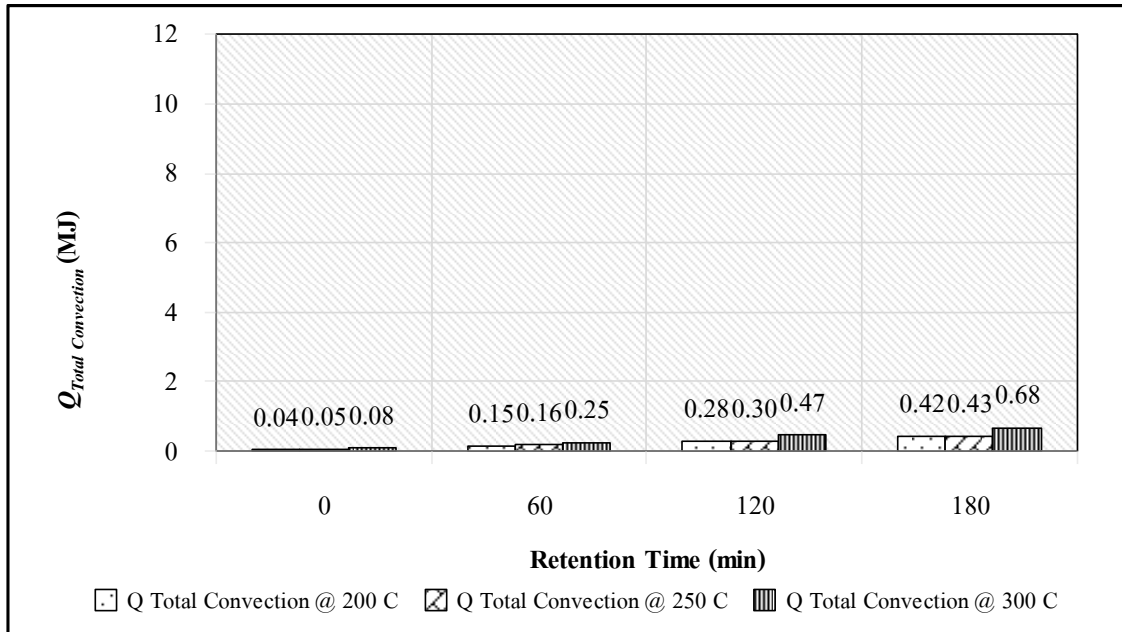


รูปที่ 3-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อน
ในรูปแบบการนำความร้อนรวม

3.2) การพาความร้อน

สำหรับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบการพาความร้อน จะเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการนำความร้อนข้างต้น กล่าวคือ การพาความร้อนจะวิเคราะห์ผลจากอุณหภูมิที่ผิวของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าที่ได้รับการส่งถ่ายความร้อนจากตัวเตา ดังนั้นเมื่อดำเนินการวิเคราะห์ผลแล้วจึงพบว่า ในรูปแบบการสูญเสีย

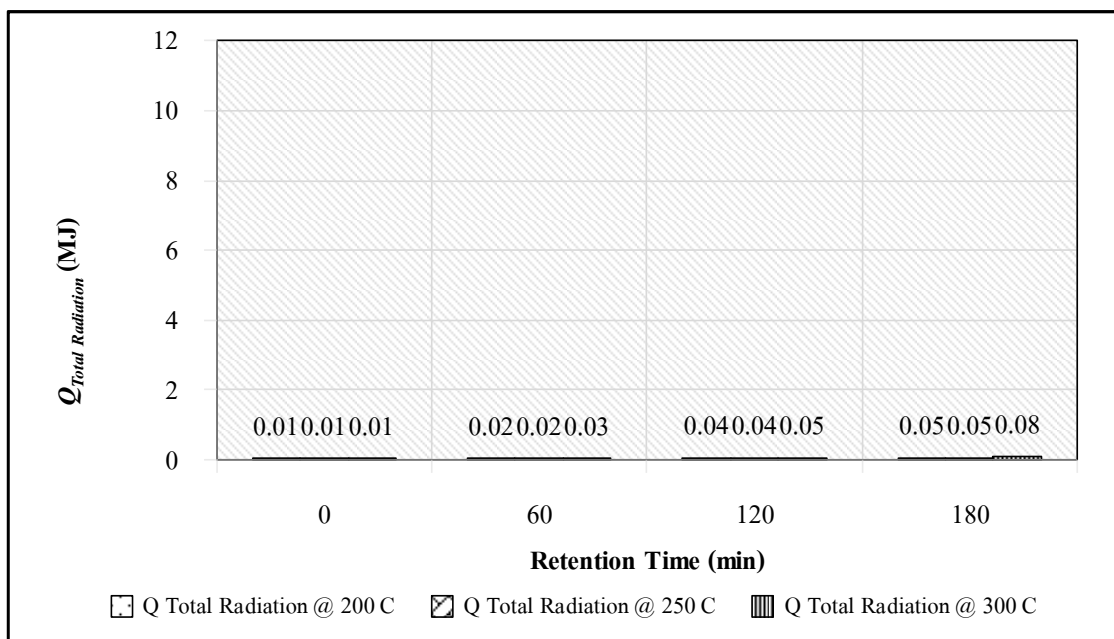
ความร้อนแบบการพาความร้อนจะมีค่าสูงสุดที่ 0.68 MJ ณ สภาวะเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที ดังแสดงในรูปต่อไป



รูปที่ 3-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อน
ในรูปแบบการพาความร้อนรวม

3.3) การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวด้านนอกของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า การสูญเสียความร้อนดังกล่าวมีค่าที่น้อยมากคือ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.01-0.08 MJ ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การสูญเสียความร้อนในรูปแบบอื่นๆ จะเห็นความแตกต่างเป็นอย่างมาก

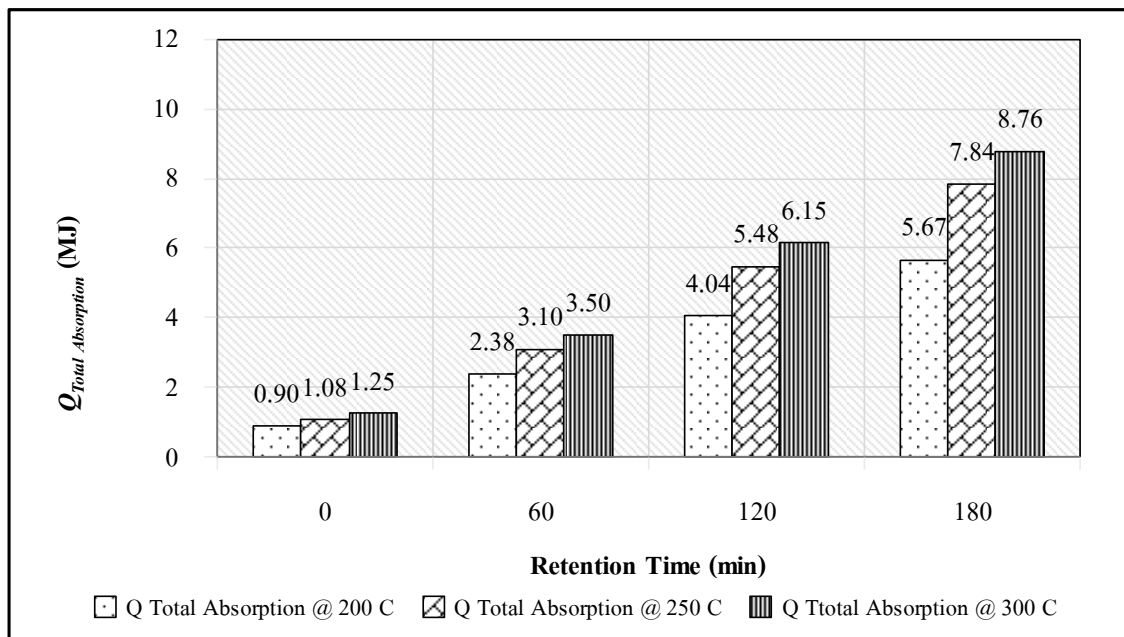


รูปที่ 3-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อน
ในรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนรวม

3.4) การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

พลังงานความร้อนที่ส่งผ่านจากภายใน ไปสู่ยังภายนอกผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดช่วงการทดลอง ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน แล้วจะพบว่าการสูญเสียพลังงานความร้อนอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งก็คือ การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า โดยเกิดการสูญเสียสูงที่สุด ณ เงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที มีค่าการสูญเสียความร้อน 8.76 MJ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อน
ในรูปแบบการสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

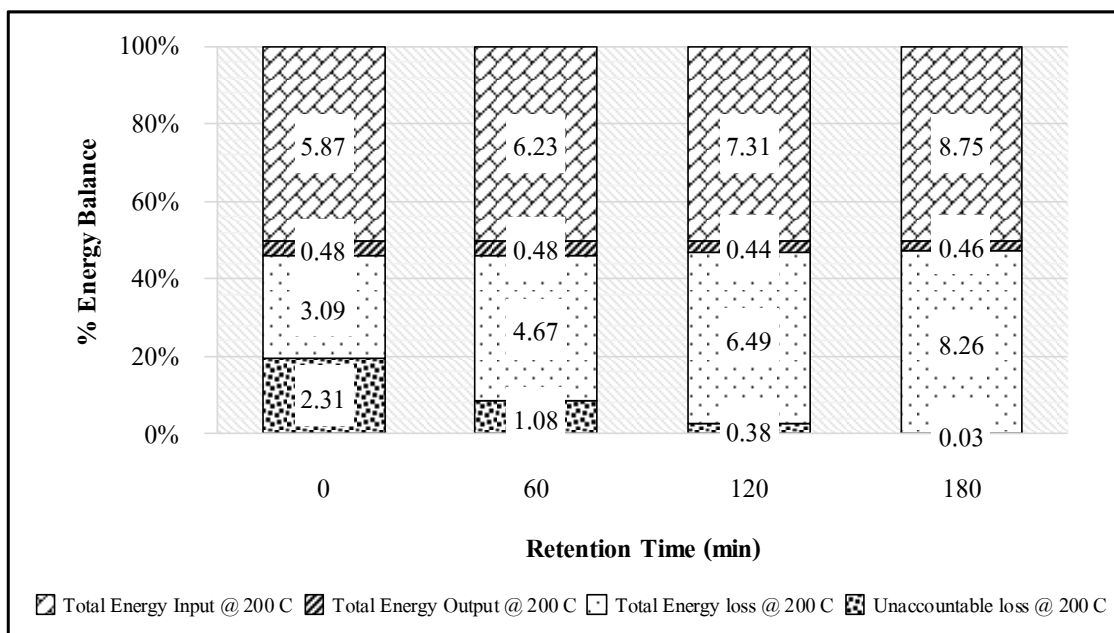
3.12.4 พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้

จากผลการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนต่างๆ ข้างต้น จะสังเกตเห็นได้ว่ามีค่าความแตกต่างระหว่าง พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น กับพลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย และพลังงานสูญเสียต่างๆ โดยค่าดังกล่าวจะเรียกว่า “พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้ (Unaccountable Loss)” ซึ่งเป็นพลังงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง อาทิเช่น การพาความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบน และด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า พลังงานภายในของสารประกอบของน้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ เป็นต้น ทั้งนี้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ดำเนินการวิเคราะห์การสูญเสียในด้านดังกล่าวโดยตรง แต่จะใช้สมการสมดุลพลังงานช่วยในการวิเคราะห์ผล ซึ่งพบว่าค่าพลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.02-3.65 MJ

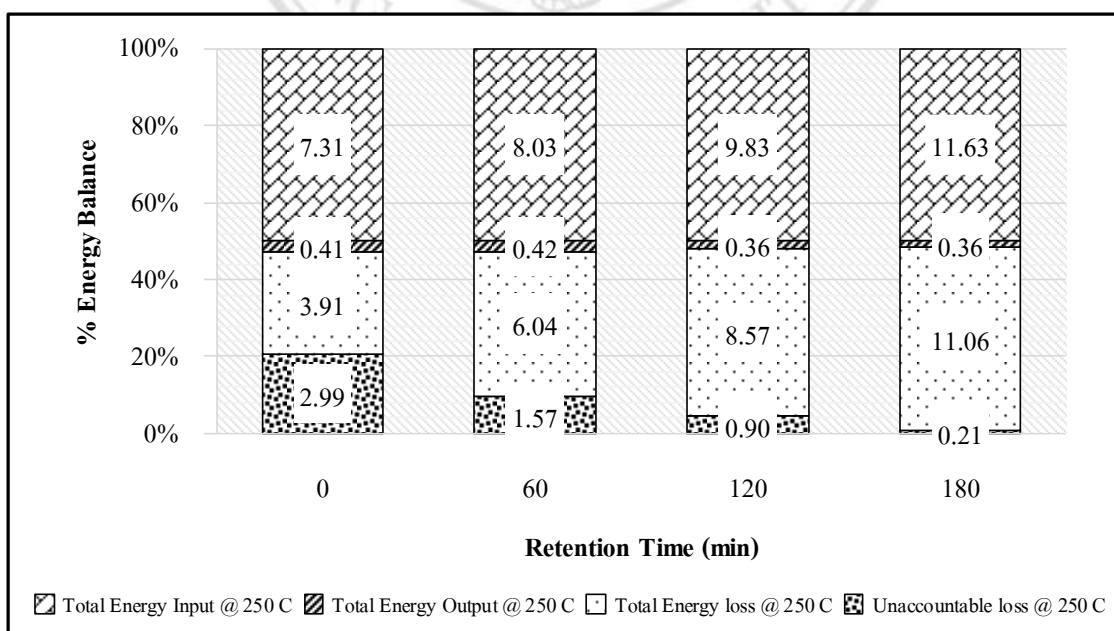
3.12.5 บทสรุปการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน

สำหรับการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะสามารถสรุปได้ว่า พลังงานที่ใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการสูญเสียความร้อนต่างๆ อาทิเช่น การสูญเสียความร้อนให้แก่ถังปฏิกรณ์ความดันสูง ผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนพลังงานที่สามารถผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง เป็นหลัก ทั้งนี้จะเกิดพลังงานสูญเสียบางส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ อาทิเช่น

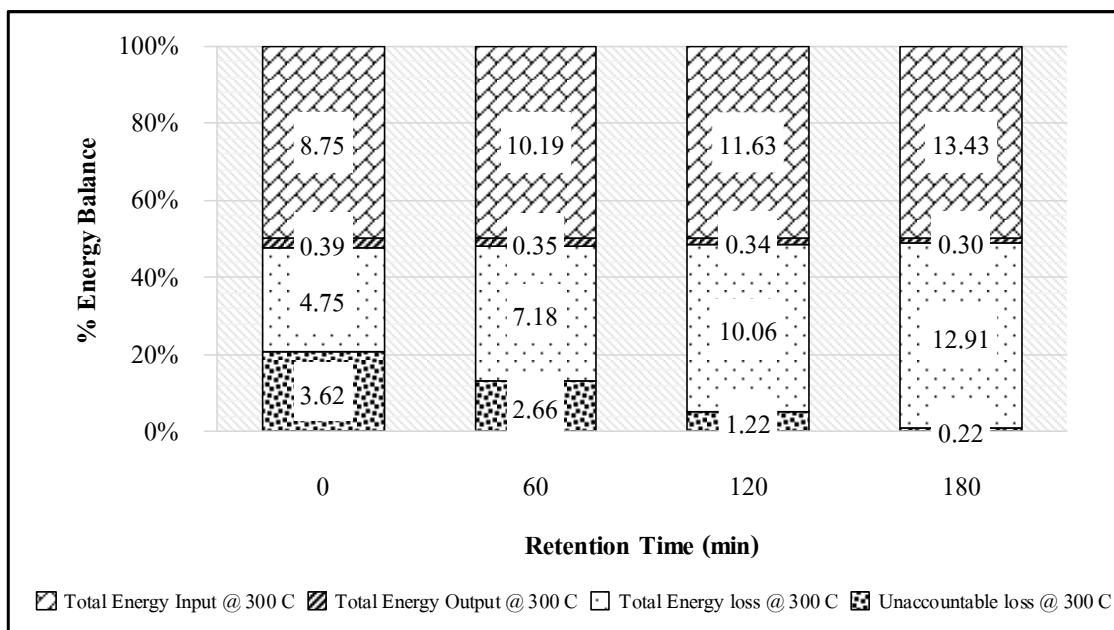
พลังงานจากก๊าซที่เกิดขึ้น พลังงานจากสารประกอบของน้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ เป็นต้น ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจึงสามารถแสดงสมดุลพลังงานของการทดลองในแต่ละเงื่อนไขได้ดังกราฟต่อไปนี้



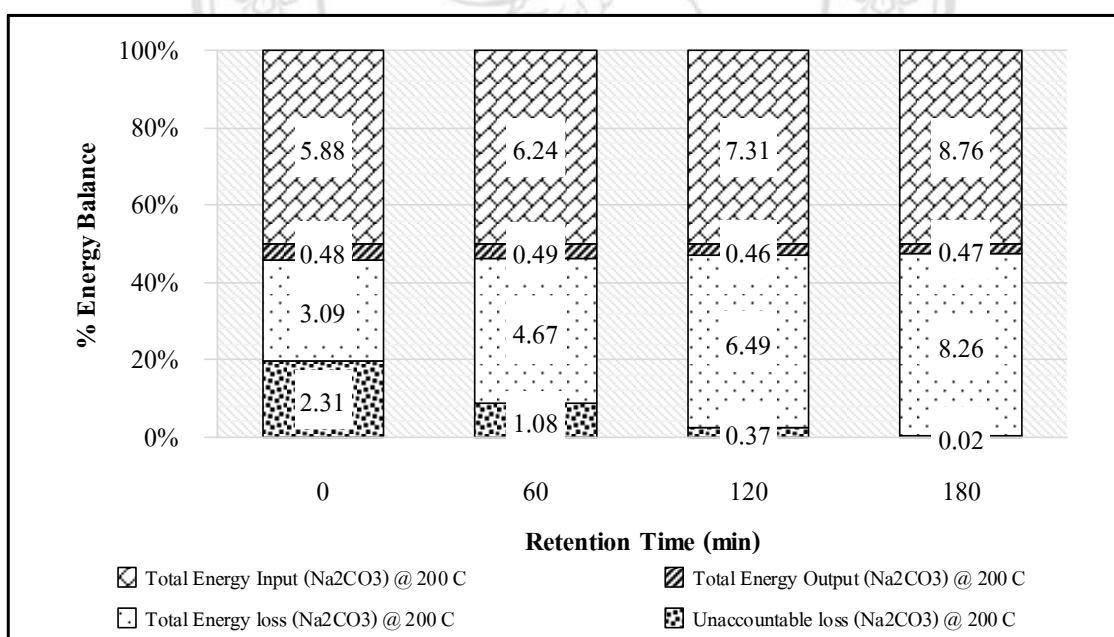
รูปที่ 3-31 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C
(แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



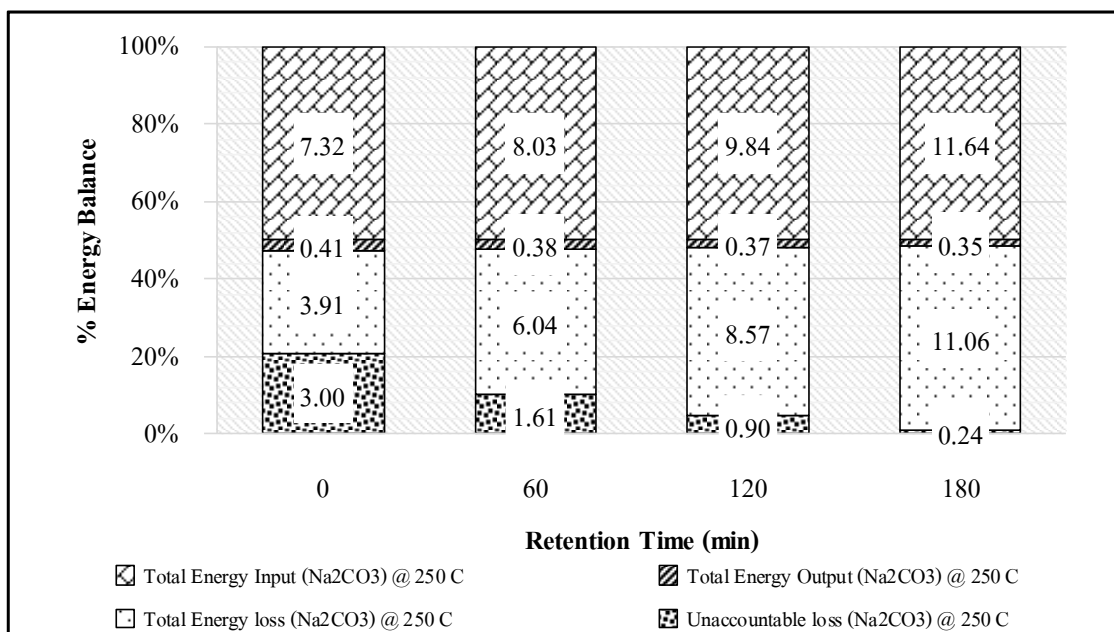
รูปที่ 3-32 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C
(แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



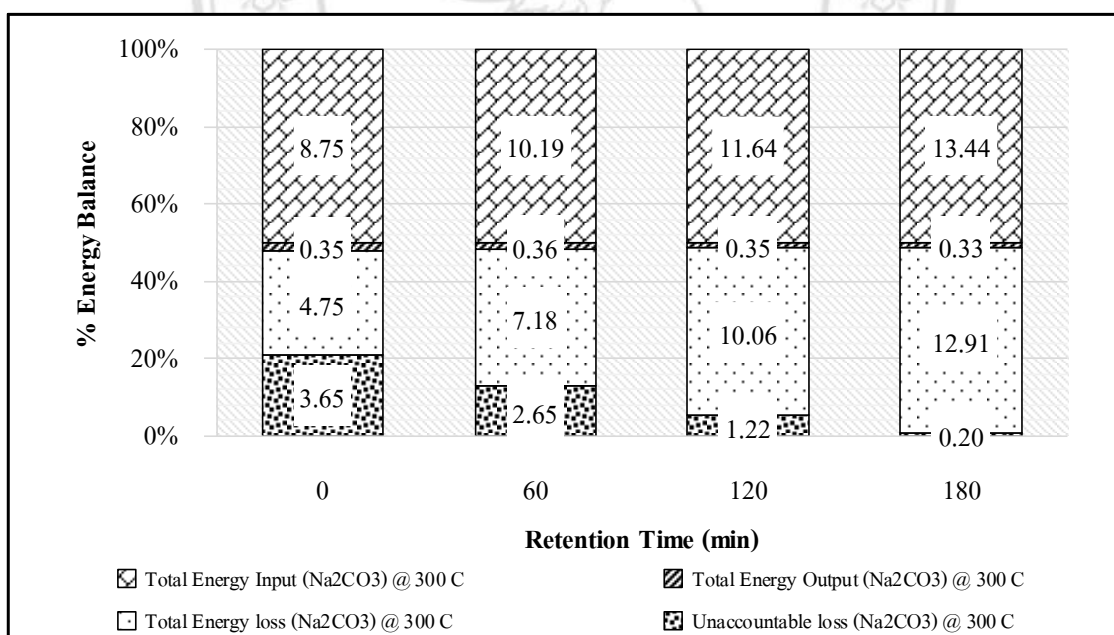
รูปที่ 3-33 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C
(แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)



รูปที่ 3-34 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 200 °C
(แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)



รูปที่ 3-35 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 °C
(แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)



รูปที่ 3-36 สมดุลพลังงานในการทดลองเงื่อนไขที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 °C
(แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับแนวทางการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาโดยเริ่มตั้งแต่ การออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า การจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี เครื่องมือตรวจวัดและวิเคราะห์ การทดลองตามแต่ละเงื่อนไข การตรวจวัด และการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ทั้งในส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซ น้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆ ที่ได้ทดลองจนสามารถดำเนินการสรุปผลการวิจัยที่สำคัญ และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาวิจัยทั้งหมด 2 ข้อ คือ 1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และ 2. เพื่อทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนสูงและคุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้น ได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สามารถแบ่งการพิจารณาความเหมาะสมออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

- 1) **“ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลว”** ภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เร้นับเวลาทำปฏิกิริยา แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ปริมาณร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้สูงสุดร้อยละ 32.33
- 2) **“ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลว”** เงื่อนไขที่เหมาะสมคือ สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที แบบใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด คือ 43.74 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันเตา (42.10 MJ/kg) และน้ำมันดีเซล (42-46 MJ/kg)

- 3) “ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน” สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมจะอยู่ภายใต้สภาวะการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด 57.53%

4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนสูงและคุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากผลการทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนสูงและคุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ ณ สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด ไปดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติในแบบประมาณพบว่า เชื้อเพลิงเหลวประกอบไปด้วย สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และจีเถ้า ประมาณร้อยละ 91.36 7.40 0.95 และ 0.29 ตามลำดับ และการวิเคราะห์คุณสมบัติในแบบแยกธาตุพบว่า มวลประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ในปริมาณร้อยละ 78.22 9.79 9.80 และ 0.31 ตามลำดับ ทั้งนี้เชื้อเพลิงเหลวมีสูตรเคมีอย่างง่าย คือ $\text{CH}_{1.909}\text{O}_{0.120}\text{N}_{0.004}$ และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3.30 ± 0.06

4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัย

แนวทางการพัฒนางานวิจัยในลำดับต่อไปในอนาคต ควรดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และการจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรมการทำปฏิกิริยาของสารประกอบต่างๆ ในการทดลองสำหรับในส่วน of ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ เชื้อเพลิงเหลว ควรนำไปศึกษาวิจัย และปรับปรุงคุณภาพให้มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร ทิพย์าวงศ์ “เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล.” กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 2552 256 หน้า 1, 3-5
- [2] กระทรวงพลังงาน “แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554-2573)” ไฟล์ข้อความ http://www.eppo.go.th/ccep/download/NEEP2030_FINAL.pdf 27 มกราคม 2556
- [3] กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ กระทรวงพลังงาน “Annual Report 2007 Petroleum and Coal activities in Thailand Department of Mineral fuels,” Page 21, 2007, Text File: http://www.dmf.go.th/resources/annualReport/annual/th/annualReport_2007_th.pdf, 27 January 2014.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน “รายงานพลังงานของประเทศไทย 2555” พ.ศ. 2555 หน้า 8 ไฟล์ข้อความ www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/energy_2011_1/energy_2011_1.pdf 27 มกราคม 2556
- [5] สำนักงานนโยบายและแผน กระทรวงพลังงาน “ชีวมวล” ไฟล์ข้อความ <http://www.eppo.go.th/engy/Load/ET08.pdf> 27 มกราคม 2556
- [6] Andre Faaij., “MODERN BIOMASS CONVERSION TECHNOLOGIES” Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2006) 11: 343–375.
- [7] Peter McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," Bioresource Technology, vol. 83, pp. 47-54, 2002.
- [8] In-Hee Hwang, Hiroya Aoyama, Toshihiko Matsuto, Tatsuhiro Nakagishi, Takayuki Matsuo., "Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment using subcritical water," Waste Management, vol. 32, pp. 410-416, Mar 2012.
- [9] Mehmet K. Akalin, Kubilay Tekin, Selhan Karagöz., "Hydrothermal liquefaction of cornelian cherry stones for bio-oil production," Bioresource Technology, vol. 110, pp. 682-687, 2012.
- [10] S-J. Moon, I-Y. Eom, J-Y. Kim, T-S. Kim, S.M. Lee, I-G. Choi, J.W. Choi., Characterization of lignin-rich residues remaining after continuous super-critical water

- hydrolysis of poplar wood (*Populus albaglandulosa*) for conversion to fermentable sugars, *Bioresource Technology* 102 (2011) 5912–5916.
- [11] Pandji Prawisudha, Tomoaki Namioka and Kunio Yoshikawa., "Coal alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal treatment," *Applied Energy*, vol. 90, pp. 298-304, 2012.
- [12] Yixin Qu, Xiaomin Wei, Chongli Zhong., "Experimental study on the direct liquefaction of *Cunninghamia lanceolata* in water," *Energy*, vol. 28, pp. 597-606, 2003.
- [13] Kawin Supawittayayothin and Nakorn Tippayawong., "Parametric Investigation of Biochar Production from Bamboo Using Hydrothermal Carbonization," The International conference of the Thai Society of Agricultural Engineering 2012 April 4 – 5, 2012, Chiangmai, Thailand.
- [14] Nakorn Worasuwanarak, Phatamaporn Potisri and Wiwut Tanthapanichakoon "Upgrading of biomass by carbonization in hot compressed water" *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 28(5) : pp. 1049-1057, 2006.
- [15] Nakorn Tippayawong, Chatchawan Chaichana, Anucha Promwangkwa, Prasert Rerkkriangkrai., "Gasification of cashew nut shells for thermal application in local food processing factory," *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, pp. 69-72, 2011.
- [16] กรมส่งเสริมการเกษตร “สถิติผู้ขึ้นทะเบียนรายพืช ปี 2554” เว็บไซต์ <http://www.survey.doae.go.th> 27 มกราคม 2556
- [17] กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ “สถิติการเพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์ทั้งประเทศ ปี 2554” เว็บไซต์ <http://www.survey.doae.go.th> 27 มกราคม 2556
- [18] Shuangning Xiu, Abolghasem Shahbazi, Vestel Shirley, Dan Cheng., "Hydrothermal pyrolysis of swine manure to bio-oil: Effects of operating parameters on products yield and characterization of bio-oil," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 88, pp. 73-79, 2010.
- [19] Kubilay Tekina, Selhan Karagöz, Sema Bektas., "Hydrothermal liquefaction of beech wood using a natural calcium borate mineral," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 72, pp. 134-139, 2012.
- [20] Dong Zhou, Liang Zhang, Shicheng Zhang, Hongbo Fu, and Jianmin Chen., "Hydrothermal Liquefaction of Macroalgae *Enteromorpha prolifera* to Bio-oil," *Energy & Fuels*, vol. 24, pp. 4054-4061, 2010/07/15 2010.

- [21] Daniel Schneider, Marina Escala, Kawin Supawittayayothin, Nakorn Tippayawong, "Characterization of biochar from hydrothermal carbonization of bamboo," INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 2, Issue 4, 2011 pp.647-652.
- [22] S. Kent Hoekman, Amber Broch, and Curtis Robbins "Hydrothermal Carbonization (HTC) of Lignocellulosic Biomass" Energy & Fuels, vol. 25, pp. 1802-1810, 2011/04/21 2011.
- [23] Moriyasu Nonaka , Tsuyoshi Hirajima and Keiko Sasaki., "Upgrading of low rank coal and woody biomass mixture by hydrothermal treatment," Fuel, vol. 90, pp. 2578-2584, 2011.
- [24] Atul Mohod, Sudhir Jain and Ashok Powar., "Cashew Nut Shell Waste: Availability in Small-Scale Cashew Processing Industries and Its Fuel Properties for Gasification," International Scholarly Research Network, ISRN Renewable Energy, Vol. 2011, Article ID 346191, 4 pages.
- [25] S. H. Sengar, A. G. Mohod, Y. P. Khandetod., "Performance Evaluation of Kiln for Cashew Nut Shell Carbonization and Liquid," International Journal of Energy Engineering 2012, 2(3): pp. 78-85.
- [26] Piyali Das and Anuradda Ganesh., "Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell—a near fuel," Biomass and Bioenergy, vol. 25, pp. 113-117, 2003.
- [27] R.N. Singh, U. Jena, J.B. Patel, A.M. Sharma., "Feasibility study of cashew nut shells as an open core gasifier feedstock," Renewable Energy, vol. 31, pp. 481-487, 2006.
- [28] Saqib Sohail Toor a, Lasse Rosendahl, Andreas Rudolf., "Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies," Energy, vol. 36, pp. 2328-2342, 2011.
- [29] Lynn Yarris "The Evolutionary Road to Biofuels," Website: <http://www.lbl.gov/Publications/YOS/Feb/>, 3 April 2014.
- [30] Maria Lucilia dos Santos, and Gouvan C. de Magalhães., "Utilisation of Cashew Nut Shell Liquid from Anacardium occidentale as Starting Material for Organic Synthesis: A Novel Route to Lasiodiplodin from Cardols," J. Braz. Chem. Soc., Vol. 10, No. 1, 13-20, 1999.
- [31] Noel J Riggs and Steve B Scott "The Top 5 Cashew Nut producing countries," Website: <http://datadigest.in/cashew-nut-shell-liquid-exports-market-in-india-statistical-data/>, 3 April 2014.

- [32] พัน มาลีวรรณ และพุ่ม อารีย์ “พันธและการปรับปรุงบำรุงพันธุ์มะม่วงหิมพานต์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ” เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาเรื่องมะม่วงหิมพานต์สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ณ สำนักงานเกษตรภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น 6-8 กันยายน 2522 พ.ศ. 2552
- [33] วิจิตต์ วรรณจิต “มะม่วงหิมพานต์” คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ.2528
- [34] Sugumaran P, “Production of activated carbon from agro-wastes for application in textile effluent treatment,” Ph.D Thesis, Submitted to University of Madras, 2009.
- [35] ประเทืองศรี ลินชัยศรี “คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีและการแปรรูปของมะม่วงหิมพานต์” อุตสาหกรรมสาร 34(7): 9-16 พ.ศ. 2534
- [36] สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต “มะม่วงหิมพานต์” อุตสาหกรรมสาร 32(1): 28-29 พ.ศ. 2532
- [37] A. J. Tsamba, W. Yang, W. Blasiak, and M. A. Wo'jtowicz., "Cashew Nut Shells Pyrolysis: Individual Gas Evolution Rates and Yields," Energy & Fuels, vol. 21, pp. 2357-2362, 2007/07/01 2007.
- [38] Nakorn Tippayawong, Nakarin Saengow, Ekarin Chaiya, Narawut Srisang., "Production of charcoal from woods and bamboo in a small natural draft carbonizer," INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 1, Issue 5, 2010 pp.911-918.
- [39] M. Venkata Ramanan, E. Lakshmanan, R. Sethumadhavan, and S. Renganarayanan., "Modeling and Experimental Validation of Cashew Nut Shell Char Gasification Adopting Chemical Equilibrium Approach," Energy & Fuels, vol. 22, pp. 2070-2078, 2008/05/01 2008.
- [40] Suman K Pramanik, "Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine," Renewable Energy, vol. 28, pp. 239-248, 2003.
- [41] Ari Saario, Amândio Rebola, Pedro J. Coelho, Mário Costa and Antti Oksanen., "Heavy fuel oil combustion in a cylindrical laboratory furnace: measurements and modeling," Fuel, vol. 84, pp. 359-369, 2005.
- [42] Asia Biomass Energy Cooperation Promotion Office “Sub-critical or Supercritical Water Can Change Waste Woody Biomass to Useful Energy Resources!,” Website: http://www.asiabiomass.jp/english/topics/1101_01.html, 7 December 2013.

- [43] Kuliah “Thermal Conversion: Pyrolysis and Liquefaction” Text File: [http://kimia.ft.uns.ac.id/file/Kuliah/Tek.%20 Biomassa%20 NReg./Chapter%20 8 % 2 0 - % 2 0 Thermal%20 Conversion%20 0 -% 2 0 Pyrolysis%20 0 and%20 0 Liquefaction.pdf](http://kimia.ft.uns.ac.id/file/Kuliah/Tek.%20Biomassa%20NReg./Chapter%208%20-%20Thermal%20Conversion%20-%20Pyrolysis%20and%20Liquefaction.pdf), 3 April 2014.
- [44] Chunbao Xu and Nimisha Lad., “Production of Heavy Oils with High Caloric Values by Direct Liquefaction of Woody Biomass in Sub/Near-critical Water,” *Energy & Fuels* 2008, 22, 635–642.
- [45] Frank Behrendt, York Neubauer, Michael Oevermann, Birgit Wilmes Nico Zobel., “Direct Liquefaction of Biomass,” *Chem. Eng. Technol.* 2008, 31, No. 5, 667–677.
- [46] University of Illinois at Urbana Champaign Department of Agricultural and Biological Engineering “ Illini Algae - Hydrothermal Liquefaction,” Website: <http://algae.illinois.edu/Projects/Hydrothermal.html>, 3 December 2013.
- [47] Wan-Ting Chen, Yuanhui Zhang, Jixiang Zhang, Guo Yu, Lance C. Schideman, Peng Zhang, Mitchell Minarick., “Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil,” *Bioresource Technology*, Volume 152, January 2014, Pages 130-139, ISSN 0960-8524.
- [48] นุชา สายพุดกสิกร “การสกัดองค์ประกอบที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพจากอบเชยเทศโดยใช้น้ำกึ่งวิกฤต” วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหารภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2553
- [49] ปราโมทย์ คูจิตจรารุ “น้ำกึ่งวิกฤต (Subcritical water) และการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร” วารสารจารย์พา Food & Health 14: 51-53 พ.ศ. 2549
- [50] สมิธ และเจ. เอ็ม. “หลักเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวิศวกรรมเคมี (Introduction to Chemical Engineering Thermodynamic)” กรุงเทพฯ: ท็อป 2552 692 หน้า: 56-59
- [51] ศ.ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี และดร.ฐรัตน์ ชารักษ์ “รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ: การพัฒนาเตาต้มที่มีส่วนทำความร้อนภายนอกสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน” 4 – 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2551
- [52] Cebeci, T., 1974. “Laminar-free-convective-heat transfer from the outer surface of a vertical circular cylinder”. In *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference*, Tokyo, pp. 1–64.
- [53] Minkowycz, W. J., and Sparrow, E. M., 1974. “Local non similar solutions for natural convection on a vertical cylinder”. *Journal of Heat Transfer*, 96, pp. 178–183.

- [54] Sparrow, E. M., and Gregg, J. L., 1956. "Laminar-free-convection heat transfer from the outer surface of a vertical circular cylinder". Transactions of the ASME, 78, pp. 1823–1829.
- [55] Tomoaki Minowa, Teruo Kondo and Soetrisno T. Sudirjo., 1998. "Thermochemical liquefaction of indonesian biomass residues." Biomass and Bioenergy Vol. 14, Nos. 5/6, pp. 517±524.
- [56] M. Sevilla and A. B. Fuertes, "The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose," Carbon, vol. 47, pp. 2281-2289, 2009.
- [57] ME 354 - Thermofluids Laboratory Spring 1999 "LAB 2 - HEATING VALUE OF FUEL," Website: http://www2.latech.edu/~hhegab/pages/me354/Lab2/Lab2_bombcal_Sp97.htm, 3 April 2014.
- [58] Trustees of Dartmouth College "Enthalpy of Combustion via Calorimetry," Website: <http://www.dartmouth.edu/~pchem/75/Bomb.html>, 3 April 2014.
- [59] Parr Instrument Company "1341 Plain Jacket Bomb Calorimeter," Website: <http://www.parrinst.com/products/oxygen-bomb-calorimeters/1341-plain-jacket-bomb-calorimeter/>, 9 April 2013.
- [60] Feng Wang, Zhoufan Chang, Peigao Duan, Weihong Yan, Yuping Xu, Lei Zhang, Juan Miao, Yunchang Fan., "Hydrothermal liquefaction of Litsea cubeba seed to produce bio-oils,," Bioresource Technology, Volume 149, December 2013, Pages 509-515, ISSN 0960-8524.
- [61] Umakanta Jena, K.C. Das, J.R. Kastner., "Effect of operating conditions of thermochemical liquefaction on biocrude production from Spirulina platensis," Bioresource Technology, Volume 102, Issue 10, May 2011, Pages 6221-6229, ISSN 0960-8524.
- [62] Yi Herng Chan, Suzana Yusup, Armando T. Quitain, Yoshimitsu Uemura, Mitsuru Sasaki., "Bio-oil production from oil palm biomass via subcritical and supercritical hydrothermal liquefaction," The Journal of Supercritical Fluids, Volume 95, November 2014, Pages 407-412, ISSN 0896-8446.
- [63] Appell, H. R., Fu, Y. C., Illig, E. G., Steffgen, F. W., and Miller, R. D. (1975). "Conversion of Cellulosic Wastes to Oil," U.S. Bureau of Mines Report Invest. 8013. Washington, D.C.
- [64] Didem O, Filiz K. "Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake," Renewable Energy 2004;29:779e87.

ผลงานการประชุมวิชาการ

ชื่อผลงาน	สถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
ผู้เขียน	นิตยธินันท์ บริรักษ์* และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ
ชื่องาน	การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28
ผู้จัด	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
วันที่จัดงาน	ระหว่างวันที่ 15 - 17 ตุลาคม 2557
สถานที่จัดงาน	โรงแรมพลูแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จังหวัดขอนแก่น
ชื่อผลงาน	High Pressure Reactor System Design for Hydrothermal Process in Laboratory Scale
ผู้เขียน	Nitthinan Borirak and Chatchawan Chaichana
ชื่องาน	MIER2 0 1 5 Joint Symposium on Mechanical - Industrial Engineering, and Robotics 2015
ผู้จัด	Muroran Institute of Technology - Chiang Mai University
วันที่จัดงาน	May 29-30, 2015
สถานที่จัดงาน	Muroran Institute of Technology, Muroran Hokkaido, Japan

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Suitable Conditions for Liquid Fuel Production from Cashew Nut Shell using Hydrothermal Process without Catalyst

นิตยธิวัฒน์ บริรักษ์* และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 053-944-904, โทรสาร: 053-217-118

Email: Nitthinan@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว โดยการศึกษาได้ใช้ของผสมระหว่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:10 เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศา/นาที และทำปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 60 120 และ 180 นาที พร้อมทั้งศึกษาร้อยละของผลผลิตที่ได้ (%Yield) ค่าความร้อนสูง (HHV) ของเชื้อเพลิงเหลว และวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว คือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่สั้น (0 นาที) ได้ปริมาณผลผลิตเป็น เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง และ ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ 32.33% 37.43% และ 30.24% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 4.62% และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูง 40.90 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันเตา (42.10 MJ/kg) และน้ำมันดีเซล (42-46 MJ/kg)

คำหลัก: เชื้อเพลิงเหลว, เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

Abstract

This paper investigated parameters for liquid fuel production from Cashew Nut Shell (CNS) using Hydrothermal Process (HTP) without catalyst. HTP experiments were performed at 10% solid concentrations and heating rate at 4 degree/min. Parameters investigated are temperature (200, 250 and 300 °C) and retention time (0, 60, 120 and 180 min). Output from the experiments were tested for yields of products, high heating values (HHV) and energy efficiency.

It was found that HTP conversion at temperature 200 °C and the shortest retention time (0 min) produced the highest amount of liquid fuel. Output ratio of liquid fuel, solid fuel and gas and organics soluble is 32.33, 37.43 and 30.24 wt.% respectively. The energy efficiency is 4.62%. The liquid fuel obtained from the HTP has similar HHV to that of fuel oils and diesel oil with HHV of 40.90 MJ/kg compared to 42.10 MJ/kg and 42-46 MJ/kg respectively.

Keywords: Liquid fuel, Cashew Nut Shell, Hydrothermal Process

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

1 บทนำ

ชีวมวล [1, 2] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยสารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น พืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม้ และเศษไม้ หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน ซึ่งชีวมวลจะประกอบไปด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย

แนวทางการแปลงสภาพชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานสามารถแยกออกเป็น 2 กระบวนการ [1] คือ 1. การแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) ได้แก่ การเผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชัน ไพโรไลซิส และไฮโดรเทอร์มอล 2. การแปลงสภาพเชิงชีวภาพ (Bio-chemical conversion) ได้แก่ การย่อย การหมัก และการหีบแยก ทั้งนี้กระบวนการแปลงสภาพชีวมวลแต่ละกระบวนการมีเงื่อนไขและสภาวะในการทำงานที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ประเภทของชีวมวล อุณหภูมิ ความดัน ตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่ได้ ฯลฯ ดังนั้นการเลือกใช้แนวทางการแปลงสภาพชีวมวลให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของชีวมวลและวัตถุประสงค์การใช้งานจึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [3, 4] คือ กระบวนการทางเคมีและความร้อนที่ใช้ น้ำ ณ สภาวะได้จุดวิกฤต (Subcritical water) อุณหภูมิ 200 – 300 °C ความดัน 1.5 – 8 MPa และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และเคมีของชีวมวลให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว ที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้น [5, 6] ทั้งนี้รูปแบบของกระบวนการดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับการกระบวนการเกิดน้ำมันปิโตรเลียม และถ่านหินตามธรรมชาติ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชหลากหลายชนิด อาทิเช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย กากถั่วเหลือง ฯลฯ ซึ่งในแต่ละปีก็จะมีปริมาณ

ของเสียเหลือทิ้งจากการเกษตรเป็นอย่างมาก จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตพลังงานด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น เผาไหม้โดยตรง การหมักก๊าซชีวภาพ ฯลฯ และจากข้อมูลการสืบค้นเอกสารพบว่าในประเทศไทยได้มีการนำชีวมวล คือ ไม้ไผ่ [7, 8] และซังข้าวโพด [9] มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน เพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับถ่านหิน สำหรับชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่มีการเพาะปลูกอยู่ภายในประเทศไทยและมีของเสียที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายคือ “เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell-CNS)” ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ส่วนคือ น้ำมัน (Cashew nut shell liquid-CNSL) และเปลือกแข็ง โดยส่วนใหญ่จะนำไปแปรรูปผ่านกระบวนการแกะเมล็ดภายในออกแล้ว จะนำไปหีบน้ำมันเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม ส่วนเปลือกที่เหลือก็จะนำไปทั้งเป็นของเสีย หรือใช้เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ต่อไป ซึ่งการเผาไหม้จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ [10] จากข้อมูลจำนวนครัวเรือนเกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนการเพาะปลูกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับกรมส่งเสริมการเกษตร ปี 2554 มีจำนวนทั้งหมด 17,285 ครัวเรือน [11] และข้อมูลปี 2547 มีพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศ 210,942 ไร่ มีเนื้อที่ให้ผลแล้ว 165,278 ไร่ ผลผลิต (เปลือก + เมล็ด) 42,126 ตันต่อปี และผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 257 kg/ปี [12] คิดเป็นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือ 25,275 ตันต่อปี (ร้อยละ 60 ของผลผลิต)

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง พร้อมทั้งศึกษาการใช้ของผสมระหว่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:10 เป็นวัตถุดิบตั้งต้นให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศา/นาที่ และทำปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 60 120 และ 180 นาที ตลอดจนการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ (%Yield) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

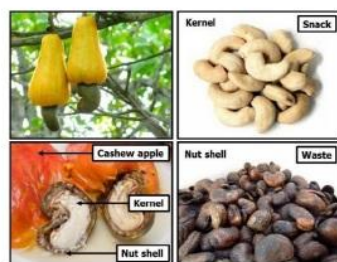
AEC-75

เหลว และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนแนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อการผลิตพลังงานทดแทนต่อไป

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชพื้นเมืองของประเทศบราซิล มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium occidentale* linn. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae โดยที่ผลจริงของมะม่วงหิมพานต์ คือส่วนที่เรียกว่าเมล็ด ที่ติดอยู่ตรงปลายก้านดอก (รูปที่ 1) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell) มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 55 – 65 เยื่อหุ้มเปลือก (Cashew testa) และเมล็ดใน (Cashew kernel) มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 35 – 45 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อนำมาบีบและสกัดจะได้น้ำมันเหลวข้นสีน้ำตาลเข้ม เรียกว่า Cashew nut shell liquid (CNSL) [13] ประมาณร้อยละ 15 – 30 โดยน้ำหนัก [14] มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) ทุกชนิด เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันได้รับความร้อนสูง บางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุนจัด กัดเยื่อจมูกและเยื่อตา [13] ในน้ำมันจะมีสารหลักๆ สองชนิดคือ กรดอนุคาร์ดิก (Anacardic acid) ประมาณร้อยละ 80 – 90 และคาร์ดอล (Cardol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่ง อีกร้อยละ 10 – 20 นอกจากนี้ยังมีอนุพันธ์ต่างๆ ของสารหลักสองชนิดนี้อีกเล็กน้อยผสมอยู่ด้วย [15]



รูปที่ 1 รูปร่างลักษณะของมะม่วงหิมพานต์

ในการจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบจะใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านกระบวนการแกะแยกเมล็ดในออกแล้ว และเมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ พบว่ามีคุณสมบัติดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 จากนั้นจึงนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่านกระบวนการบดย่อย และคัดแยก ให้มีขนาดไม่เกิน 5 mm โดยประมาณ พร้อมทั้งนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ให้มีความชื้นน้อยกว่า 5% (% dry basic) และจัดเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน

ไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน [4] เป็นกระบวนการที่อาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 200 – 350 °C และความดัน 4 – 20 MPa บางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยในการย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวลที่มีน้ำมันและความชื้นสูง เช่น สาหร่าย ผักตบชวา เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ฯลฯ ให้เป็นของเหลว โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายรูปแบบ และจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) หรือ เชื้อเพลิงเหลว”

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (หน่วย: % wt./wt.)

ลำดับที่	รายละเอียดการวิเคราะห์	
การวิเคราะห์แบบประมาณ		
1	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	22.98
2	ความชื้น (% dry basic)	13.48
3	สารระเหย (% dry basic)	80.84
4	คาร์บอนคงตัว	4.13
5	เถ้า	1.55
6	น้ำมัน CNSL	15-30
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ		
1	คาร์บอน (C)	61.12
2	ไฮโดรเจน (H)	8.39
3	ไนโตรเจน (N)	1.11
4	ซัลเฟอร์ (S)	1.70

AEC-75

2.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้

แนวทางในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละครั้ง จะดำเนินการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ได้ การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว รวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ได้ [6, 16]

สำหรับข้อมูลปริมาณของผลิตภัณฑ์ (ของแข็งของเหลว และก๊าซ) ที่เกิดขึ้นในการทดลอง ณ เงื่อนไขต่างๆ จะนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น โดยใช้สมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{Bio-oil (wt\%)} = \frac{W_{\text{Bio-oil}}}{W_{\text{feed}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Solid residue (wt\%)} = \frac{W_{\text{residue}}}{W_{\text{feed}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Gas (wt\%)} + \text{Organics soluble (OS) (wt\%)} = 1 - (\text{Bio-oil} + \text{Solid residue}) \text{ (wt\%)} \quad (3)$$

เมื่อ $W_{\text{Bio-oil}}$ คือ ปริมาณเชื้อเพลิงเหลว, g

W_{residue} คือ ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลาย, g

W_{feed} คือ ปริมาณวัตถุดิบตั้งต้น, g

2.3.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

ในการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการทดลอง จะใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์แบบบอเดียบาติก (Adiabatic bomb calorimeter) เป็นแบบที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม สามารถควบคุมอุณหภูมิของเสื้อฉนวน (Jacket) และของถังน้ำ (Steel bucket) ให้เท่ากันตลอดเวลา ซึ่งจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างถังน้ำและน้ำขึ้น และทำให้การคำนวณหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างเที่ยงตรง

การคำนวณค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) (หน่วย Cal/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{HHV} = \frac{\Delta T W - C_1 - C_2 - C_3}{m} \quad (4)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง, Cal/g

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายในการทดสอบ, °C

W คือ ค่าพลังงานเทียบเท่าของแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งได้จากการทำ Standardization โดยการเผาเชื้อเพลิงมาตรฐานในบอมบ์เพื่อ คำนวณหาค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์แต่ละชุด ซึ่งในชุดอุปกรณ์จะมีค่าเท่ากับ 2,410 Cal/°C

m คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ, g

C_1 คือ ค่าแก้ (correction) จากค่าความร้อนเนื่องจากการเกิดกรดไนตริก (HNO_3) หรือ Heat of formation กรดไนตริก

C_2 คือ ค่าแก้เนื่องค่าความร้อนจากการเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือ Heat of formation ของกรดซัลฟูริก

C_3 คือ ค่าแก้ (correction) จากค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของลวดจุดระเบิด (Heat of combustion of fuse wire)

2.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจะมีการใช้พลังงานอยู่ 2 ส่วนหลัก ซึ่งก็คือ พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์ จากนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพียงอย่างเดียว โดยสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหลว กับพลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้ง

AEC-75

ตัน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับ
ถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน} = \frac{E_{\text{Bio-oil}}}{(E_{\text{CNS}} + E)} \quad (5)$$

เมื่อ $E_{\text{Bio-oil}}$ คือ พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหลว
($W_{\text{Bio-oil}} \times \text{HHV}_{\text{Bio-oil}}$), MJ

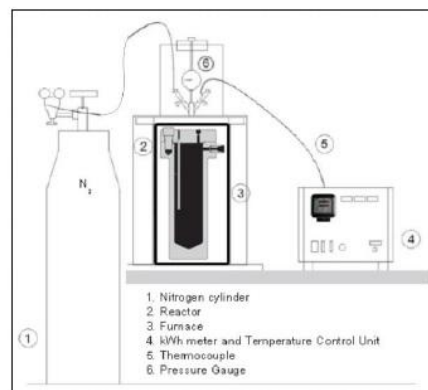
E_{CNS} คือ พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์ตั้งต้น ($W_{\text{CNS}} \times \text{HHV}_{\text{CNS}}$),
MJ

E คือ พลังงานที่ใช้เพื่อเพิ่มและรักษา
อุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์, MJ

3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้ถังปฏิกรณ์แรงดันสูง
ขนาดปริมาตร 1 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
7.63 cm และความลึก 22.86 cm สร้างจากสแตนเลส
316 S.S. ที่สามารถทนอุณหภูมิ และรับแรงดันได้
สูงสุด 340 °C และ 34 MPa ตามลำดับ โดยมีการ
ติดตั้งระบบให้ความร้อนแก่ถังปฏิกรณ์ด้วยขด
ลวดความร้อนขนาด 3 kW พร้อมทั้งมีระบบควบคุม
อุณหภูมิการทำงานจากภายในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงใน
รูปที่ 2 และในส่วนการทดลองถึงปฏิกรณ์จะถูกให้
ความร้อนจากภายนอกที่อัตราการเพิ่มขึ้นของ
อุณหภูมิ 4 องศา/นาที่ จนกว่าอุณหภูมิภายในถัง
ปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 200 250 และ
300 °C และคงสภาวะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่
0 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ โดยมีระเบียบ
ขั้นตอนในการทดลองแต่ละเงื่อนไขคือ นำเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์จากการจัดเตรียมข้างต้นมาจำนวน
20 g และน้ำกลั่นบริสุทธิ์จำนวน 200 mL ใส่ลงไปใน
ถังปฏิกรณ์จากนั้นทำการปิดถังปฏิกรณ์และปล่อยก๊าซ
ไนโตรเจน (N_2) ที่ความดัน 2.5 MPa เพื่อไล่อากาศที่
อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ออกเป็นระยะเวลา 15 นาที เมื่อ
ครบกำหนดเวลาจึงดำเนินการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ถัง
ปฏิกรณ์จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ และ
ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ต้องการ เมื่อเสร็จสิ้น
กระบวนการจะทำการลดอุณหภูมิถึงปฏิกรณ์โดยการ
ระบายความร้อนกับอากาศตามธรรมชาติจนถึง

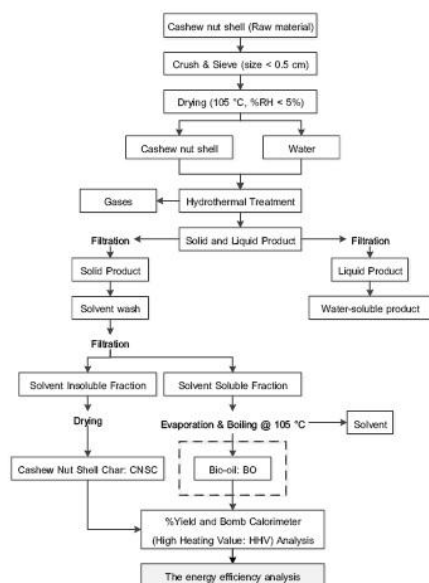
อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำของผสมที่อยู่ภายใน
ออกมาจากถังปฏิกรณ์ เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็น
ของแข็ง และของเหลว (น้ำ และสารละลายอินทรีย์ที่
สามารถละลายในน้ำได้) ออกจากกันด้วยกระบวนการ
กรอง และในขั้นตอนต่อไปจะนำผลิตภัณฑ์ที่เป็น
ของแข็งไปละลายในตัวทำละลายแอซิโตนจำนวน
200 mL จากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการกรองเพื่อ
แยกของแข็งและของเหลว (แอซิโตน และเชื้อเพลิง
เหลว) ออกจากกัน ในส่วนของแข็งจะนำไปผ่าน
กระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาไม่
น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และในส่วนของเหลวจะนำไปกลั่น
ที่อุณหภูมิ 70 °C ณ ความดันบรรยากาศเพื่อแยก
แอซิโตนออกจากเชื้อเพลิงเหลว จากนั้นนำเชื้อเพลิง
เหลวดังกล่าวไปต้มไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 105 °C และใน
ขั้นตอนสุดท้ายจะนำตัวอย่างทั้งหมดไปซึ่งน้ำหนัก
พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลต่อไป ทั้งนี้ดำเนินการทดลอง
ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ดัง
ลำดับขั้นตอนการวิจัยในรูปที่ 3



รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิจัย [4]

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

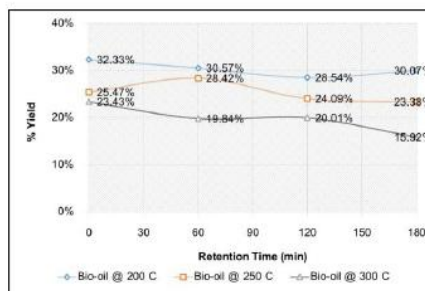
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้

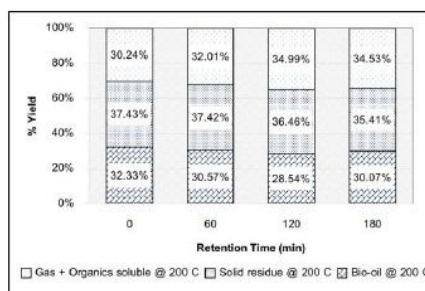
จากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา มีผลโดยตรงต่อปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจะส่งผลทำให้เกิดผลผลิตที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็งลดน้อยลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 แต่ในทางกลับกันจะส่งผลทำให้มีสัดส่วนการเกิดก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้เพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 และจากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ที่เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 นาที จะได้ปริมาณเชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ที่ 32.33% 37.43% และ 30.24% ตามลำดับ

4.2 อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวพบว่า ที่เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที จะได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความร้อนสูง มากที่สุด คือ 43.07 MJ/kg ส่วนการทดลองในเงื่อนไขอื่นๆ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูงที่ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงระหว่าง 38.83 – 40.90 MJ/kg ดังแสดงในรูปที่ 6

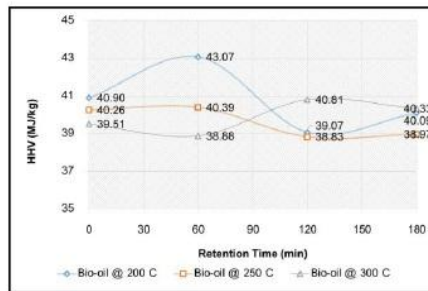


รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยา กับปริมาณร้อยละของผลผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่ได้



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำปฏิกิริยา กับปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ (เงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C)

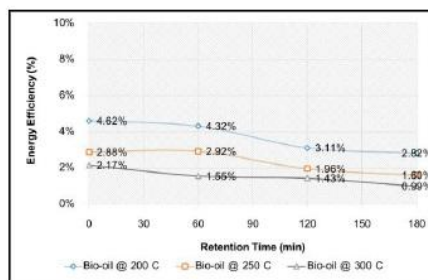
AEC-75



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำให้ปฏิกิริยา กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลวข้างต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 38.88 – 43.07 MJ/kg ซึ่งการได้มาซึ่งผลผลิตจะต้องมีการให้พลังงานตั้งแต่ถึงปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อนำมาผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานแล้วจะพบว่า สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 นาที จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด คือ 4.62% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่อุณหภูมิสูง และมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดต่ำลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการทำให้ปฏิกิริยา กับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

5 สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่สั้น (0 นาที) ได้ปริมาณผลผลิตเป็น เชื้อเพลิงเหลวเชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ 32.33% 37.43% และ 30.24% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 4.62% และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูง 40.90 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันเตา (42.10 MJ/kg) และน้ำมันดีเซล (42 – 46 MJ/kg)

6 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่สำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย และห้องวิจัยพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร ทิพย์วงศ์ "เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล." กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552. 256 หน้า : 1, 3-5.
- [2] [ระบบออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.eppo.go.th/engy/Load/ET08.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล : 27 มกราคม 2556).
- [3] In-Hee Hwang, Hiroya Aoyama, Toshihiko Matsuto, Tatsuhiro Nakagishi, Takayuki Matsuo., "Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment using subcritical water," Waste Management, vol. 32, pp. 410-416, Mar 2012.
- [4] Mehmet K. Akalin, Kubilay Tekin, Selhan Karagöz., "Hydrothermal liquefaction of cornelian

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

cherry stones for bio-oil production," *Bioresource Technology*, vol. 110, pp. 682-687, 2012.

[5] Pandji Prawisudha, Tomoaki Namioka and Kunio Yoshikawa., "Coal alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal treatment," *Applied Energy*, vol. 90, pp. 298-304, 2012.

[6] Yixin Qu, Xiaomin Wei, Chongli Zhong., "Experimental study on the direct liquefaction of *Cunninghamia lanceolata* in water," *Energy*, vol. 28, pp. 597-606, 2003.

[7] Daniel Schneider, Marina Escala, Kawin Supawittayayothin, Nakorn Tipayawong, "Characterization of biochar from hydrothermal carbonization of bamboo," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, Volume 2, Issue 4, 2011 pp.647-652.

[8] Kawin Supawittayayothin and Nakorn Tipayawong., "Parametric Investigation of Biochar Production from Bamboo Using Hydrothermal Carbonization" *The International conference of the Thai Society of Agricultural Engineering 2012 April 4 – 5, 2012, Chiangmai, Thailand.*

[9] Nakorn Worasuwannarak, Phatamaporn Potisri and Wiwut Tanthapanichakoon "Upgrading of biomass by carbonization in hot compressed water" *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 28(5) : pp. 1049-1057, 2006.

[10] Nakorn Tipayawong, Chatchawan Chaichana, Anucha Promwangkwa, Prasert Rerkriangkrai., "Gasification of cashew nut shells for thermal application in local food processing factory," *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, pp. 69-72, 2011.

[11] สถิติผู้ขึ้นทะเบียนรายพืช ปี 2554, กรมส่งเสริมการเกษตร. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.survey.doae.go.th>, (วันที่สืบค้นข้อมูล :27 มกราคม 2556).

[12] สถิติการเพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์ทั้งประเทศ ปี 2554, กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.survey.doae.go.th>, (วันที่สืบค้นข้อมูล :27 มกราคม 2556).

[13] ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี. 2534. "คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีและการแปรรูปของมะม่วงหิมพานต์". *อุตสาหกรรมสาร*. 34(7) : 9-16.

[14] Maria Lucilia dos Santos, and Gouvan C. de Magalhães., "Utilisation of Cashew Nut Shell Liquid from *Anacardium occidentale* as Starting Material for Organic Synthesis: A Novel Route to Lasiodiplodin from Cardols," *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 10, No. 1, 13-20, 1999.

[15] สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต. 2532. "มะม่วงหิมพานต์." *อุตสาหกรรมสาร*. 32(1) : 28-29.

[16] Shuangning Xiu, Abolghasem Shahbazi, Vestel Shirley, Dan Cheng., "Hydrothermal pyrolysis of swine manure to bio-oil: Effects of operating parameters on products yield and characterization of bio-oil," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 88, pp. 73-79, 2010.

High Pressure Reactor System Design for Hydrothermal Process in Laboratory Scale

Nitthinan Borirak and Chatchawan Chaichana

Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200,
Thailand

E-mail address: Nitthinan@eng.cmu.ac.th

Keywords: High Pressure Reactor, Hydrothermal Process

1 INTRODUCTION

This paper present High Pressure Reactor (HPR) system design for Hydrothermal Process (HTP) in laboratory scale. HPR has been used for contain of water and heat transfer from outside to inside reactor for boiling water. Subcritical water has hydrolytic and pyrolytic reaction characteristics, which result from a decrease in the dielectric constant and increase in the ion product of water at temperatures and pressures below and near 374 °C and 22.1 MPa (Kang et al., 2001; Brunner, 2009).

2 MATERIALS AND EXPERIMENTAL SET UP

Experiments are conducted on a pressure vessel to working pressure and temperature 5,000 psi and 343 °C, respectively explore its heat transfer characteristics for steaming different masses of water. Parameters investigated are temperature (200, 250 and 300 °C). The HPR system consists of the main equipment 4 component were

- High pressure reactor (Bolted Closure Reactors)
- Safety (Safety Heads and Rupture discs)
- Furnace (Heater and Insulator)
- Controller and measurement. (PID controller, kWh-meter, Pressure gauge and Thermocouple type K)

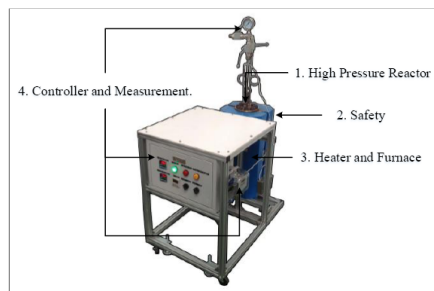


Fig. 1 Experimental setup

3 METHODOLOGY

This experiments were performed at distilled water loading 200 ml inside HPR and heat up with heating rate at 4 degree/min. Parameters investigated are temperature (200, 250 and 300 °C). Output from the experiments were measurement for stress analysis, electric power consumption and HPR efficiency.

4 RESULTS AND DISCUSSION

The results of HPR test showed that the maximum circumferential tensile stress and longitudinal stress at temperature 300 °C were 19.86 MPa and 9.93 MPa, respectively. The HPR electric power consumption are 1.5, 1.9 and 2.3 kWh and efficiency are 2.96, 3.20 and 3.49% at temperature target 200 250 and 300, respectively.

5 CONCLUSION

Experimental studies on the HPR test. It was found that were electric power consumption and efficiency increases when rise temperature.

REFERENCES

- (1) Das, T., Subramanian, R., Chakkaravarthi, A., Singh, V., Ali, S. Z. and Bordoloi, P. K., Energy conservation in rice cooking. *J. Food Eng.*, 2006, 75, 156–166.
- (2) Bhattacharya, M. and Hanna, M. A., Influence of process and product variables on extrusion energy and pressure requirements. *J. Food Eng.*, 1987, 6, 153–163.
- (3) Vijayaraghavan, S. and Goswami, D. Y., Organic working fluids for a combined power and cooling cycle. *ASME J. Energy Resour. Technol.*, 2005, 127, 125–130.

ภาคผนวก ก.
การวิเคราะห์สูตรเคมีอย่างง่าย

1 การวิเคราะห์สูตรเคมีอย่างง่ายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ข้อมูลเบื้องต้น

ตารางที่ ก-1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบแยกธาตุของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ลำดับ ที่	รายละเอียดการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์	หน่วยของผล การวิเคราะห์	เครื่องมือ /วิธีการวิเคราะห์
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ				
1	คาร์บอน (C)	61.12	% wt./wt.	CHNS analyzer
2	ไฮโดรเจน (H)	8.39	% wt./wt.	
3	ออกซิเจน (O)	27.68	% wt./wt.	
4	ไนโตรเจน (N)	1.11	% wt./wt.	
5	ซัลเฟอร์ (S)	1.70	% wt./wt.	

ตัวอย่าง การคำนวณสูตรเคมีอย่างง่าย ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

แนววิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ในแบบแยกธาตุ และการคำนวณหาสูตรเคมีอย่างง่าย ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้สูตรเคมีพื้นฐานของสารประกอบชีวมวล คือ $\text{CH}_w\text{O}_x\text{N}_y\text{S}_z$ และการเปรียบเทียบกับธาตุคาร์บอน ดังนั้นสูตรเคมีของธาตุอื่นๆ จะสามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$W = (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } H \times \text{มวลโมเลกุลของ } C) / (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } C \times \text{มวลโมเลกุลของ } H)$$

$$X = (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } O \times \text{มวลโมเลกุลของ } C) / (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } C \times \text{มวลโมเลกุลของ } O)$$

$$Y = (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } N \times \text{มวลโมเลกุลของ } C) / (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } C \times \text{มวลโมเลกุลของ } N)$$

$$Z = (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } S \times \text{มวลโมเลกุลของ } C) / (\text{อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ของ } C \times \text{มวลโมเลกุลของ } S)$$

แทนค่า

$$W = (8.39 \times 12) / (61.12 \times 1.008) = 1.636$$

$$X = (27.68 \times 12.011) / (61.12 \times 15.999) = 0.340$$

$$Y = (1.11 \times 12.011) / (61.12 \times 14.007) = 0.016$$

$$Z = (1.70 \times 12.011) / (61.12 \times 32.060) = 0.010$$

ดังนั้น สูตรเคมีอย่างง่ายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ $\text{CH}_{1.636}\text{O}_{0.340}\text{N}_{0.016}\text{S}_{0.010}$

2 การคำนวณสูตรเคมีอย่างง่ายของเชื้อเพลิงเหลว

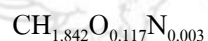
ตารางที่ ก-2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายละเอียดการ วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว			หน่วยของผล การวิเคราะห์	เครื่องมือ /วิธีการ วิเคราะห์
		จาก กระบวนการ Acetone extraction	จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล			
			แบบไม่ใช้ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	แบบใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาไฮเดียม คาร์บอนต (5 wt.%)		
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ						
1	คาร์บอน (C)	76.06	78.22	78.36	% wt./wt.	WI-RES-
2	ไฮโดรเจน (H)	9.45	9.79	9.84	% wt./wt.	CHNS-O-
3	ออกซิเจน (O)	9.55	9.80	9.86	% wt./wt.	001 and
4	ไนโตรเจน (N)	0.19	0.31	0.31	% wt./wt.	CHNS-O Analyzer

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จาก
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายละเอียดการ วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว			หน่วยของผล การวิเคราะห์	เครื่องมือ /วิธีการ วิเคราะห์
		จาก กระบวนการ Acetone extraction	จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล			
			แบบไม่ใช้ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	แบบใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาโซเดียม คาร์บอเนต (5 wt.%)		
5	ซัลเฟอร์ (S)	N/A	N/A	N/A	% wt./wt.	WI-RES- CHNS-O- 001 and CHNS-O Analyzer

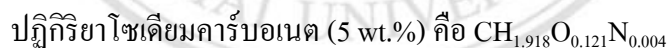
ดังนั้น สูตรเคมีอย่างง่ายของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากจากกระบวนการ Acetone extraction คือ



สูตรเคมีอย่างง่ายของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่ง



สูตรเคมีอย่างง่ายของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบแบบใช้ตัวเร่ง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ข.
การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

1 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ
ข้อมูลเบื้องต้น

ตารางที่ ข-1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นในแบบประมาณ และแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ ที่	รายละเอียดการ วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว			หน่วยของ ผลการ วิเคราะห์	เครื่องมือ /วิธีการ วิเคราะห์
		จาก กระบวนการ การ Acetone Extraction	จากกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล			
			แบบไม่ใช้ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	แบบใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาโซเดียม คาร์บอเนต (5 wt.%)		
การวิเคราะห์แบบประมาณ						
1	ค่าความร้อนสูง	38.73	40.90	41.47	MJ/kg	Bomb calorimeter
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ						
1	คาร์บอน (C)	76.06	78.22	78.36	% wt./wt.	WI-RES- CHNS-O- 001 and CHNS-O Analyzer
2	ไฮโดรเจน (H)	9.45	9.79	9.84	% wt./wt.	
3	ไนโตรเจน (N)	0.19	0.31	0.31	% wt./wt.	
4	ออกซิเจน (O)	9.55	9.80	9.86	% wt./wt.	
6	ซัลเฟอร์ (S)	N/A	N/A	N/A	% wt./wt.	

ตัวอย่าง การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

แนววิเคราะห์

สูตรของคูลอง

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = 0.3383C + 1.422 (H - O/8)$$

สูตรของ SEYLER's formula

$$\text{Gross calorific value (cal/g)} = 123.9C + 388.1H + 0.25O^2 - 4269$$

แทนค่า

สูตรของคูลอง

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = (0.3383 \times 78.22) + 1.422 (9.79 - (9.55/8))$$

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = 38.64$$

สูตรของ SEYLER's formula

$$\text{Gross calorific value (cal/g)} = (123.9 \times 78.22) + (388.1 \times 9.79) + (0.25 \times 9.80) - 4269$$

$$\text{Gross calorific value (cal/g)} = 9246.93$$

$$\text{Gross calorific value (MJ/kg)} = 38.72$$

ดังนั้นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรของคูลอง และ SEYLER's formula

มีค่า 38.64 และ 38.72 MJ/kg ตามลำดับ

2 คำนวณร้อยละของค่าความแตกต่างจากการตรวจวัดด้วยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

ข้อมูลเบื้องต้น

ค่าความร้อนที่ได้จากการตรวจวัดด้วยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ 40.90 MJ/kg

ค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรของคูลอง และ SEYLER's formula มีค่า 38.64 และ 38.72 MJ/kg ตามลำดับ

ตัวอย่าง การคำนวณร้อยละของค่าความแตกต่างจากการตรวจวัดด้วยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

แนววิเคราะห์

$$\text{ร้อยละของค่าความแตกต่าง} = (\text{ค่ามาก} - \text{ค่าน้อย}) / \text{ค่ามาก}$$

แทนค่า

สูตรของคูลอง

$$\text{ร้อยละของค่าความแตกต่าง} = (40.90 - 38.64) / 40.90$$

$$\text{ร้อยละของค่าความแตกต่าง} = 5.53\%$$

สูตรของ SEYLER's formula

$$\text{ร้อยละของค่าความแตกต่าง} = (40.90 - 38.72) / 40.90$$

$$\text{ร้อยละของค่าความแตกต่าง} = 5.33\%$$

ดังนั้น ร้อยละของค่าความแตกต่างที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรของคูลอง และ SEYLER's formula กับการตรวจวัดด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ มีค่า 5.53 และ 5.33 ตามลำดับ หรือเฉลี่ยประมาณ 5.43

ตารางที่ ข-2 การคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

ลำดับ ที่	ตัวอย่าง เชื้อเพลิงเหลว	Bomb calorimeter	Dulong formula	SEYLER's formula	ร้อยละของค่าความแตกต่าง		
					Dulong formula	SEYLER's formula	เฉลี่ย
1	Acetone extraction	38.73	37.47	37.04	3.25	4.36	3.81
2	แบบไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	40.90	38.64	38.72	5.53	5.33	5.43
3	แบบใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	41.47	38.75	38.87	6.56	6.27	6.41

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

1 การคำนวณค่าคุณภาพไอน้ำ

ข้อมูลเบื้องต้น

ปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง 1 ลิตร หรือ 0.001 ลูกบาศก์เมตร (m^3)

ปริมาตรน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 200 มิลลิลิตร

ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) ของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง เท่ากับ (v) $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$

ปริมาตรจำเพาะของเหลว (v_f) และก๊าซ (v_g) ที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C

ตัวอย่าง การหาคำนวณค่าคุณภาพไอน้ำ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C

แนววิเคราะห์

$$v = v_f + x v_{fg}$$

$$v = v_f + x (v_g - v_f)$$

แทนค่า

$$0.005 = 0.001156 + X (0.12736 - 0.001156)$$

$$X = (0.005 - 0.001156) / 0.126204$$

$$X = 0.03045$$

$$X = 3.045\%$$

ดังนั้นค่าคุณภาพไอน้ำ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C มีค่า 3.045%

2 การคำนวณปริมาณของผสมอิมัตวในแต่ละสถานะ

ข้อมูลเบื้องต้น

ปริมาตรน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 200 มิลลิลิตร หรือน้ำหนักประมาณ (m_{total}) 200 กรัม (g)

ค่าคุณภาพไอน้ำ (X) = 0.0304586

ตัวอย่าง การหาคำนวณปริมาณของผสมอิมัตวในแต่ละสถานะ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

แนววิเคราะห์

แทนค่า

$$m_g = X m_{total}$$

$$m_f = m_{total} - m_g$$

$$m_g = (0.03045) \times 200$$

$$m_g = 6.09 \text{ g}$$

$$m_f = m_{total} - m_g$$

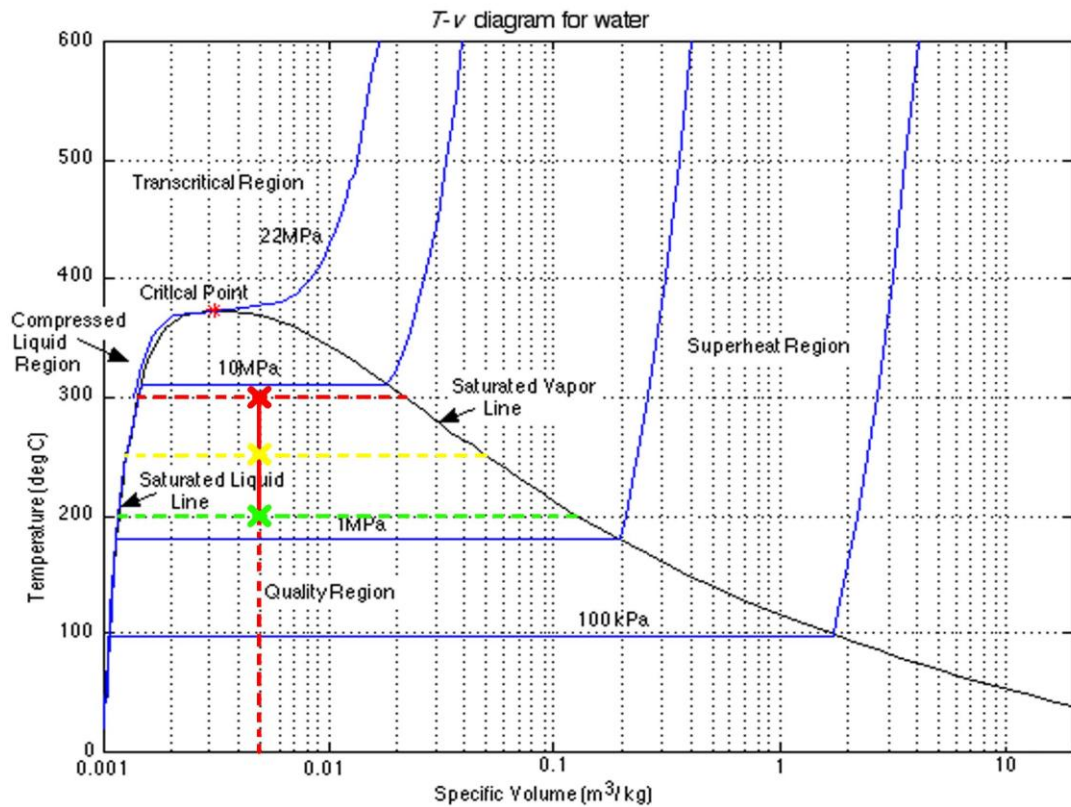
$$m_f = 200 - 6.09$$

$$m_f = 193.91 \text{ g}$$

ดังนั้นปริมาณของผสมอิมัตว ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C มีค่า $m_g = 6.09 \text{ g}$ และ $m_f = 193.91 \text{ g}$

ตารางที่ ก-1 สรุปผลการคำนวณค่าคุณภาพไอน้ำ และปริมาณของผสมอิมัตวในแต่ละสถานะ

ลำดับ ที่	อุณหภูมิ เป้าหมาย (°C)	v_f (m ³ /kg)	v (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	สถานะของน้ำ กลั่นบริสุทธิ์ ภายในถัง ปฏิกรณ์ความ ดันสูง	ค่า คุณภาพ ไอน้ำ (X)	ปริมาณของผสมอิมัตว ในแต่ละสถานะ	
							ของเหลว (m_f) (g)	ไอน้ำ (m_g) (g)
1	200	0.001156	0.005	0.12736	ของผสมอิมัตว	3.05%	193.91	6.09
2	250	0.001251		0.05013	(Saturated	7.67%	184.66	15.34
3	300	0.001404		0.02167	mixture)	17.74%	164.51	35.49



รูปที่ ค-1 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะของน้ำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

ภาคผนวก ง.
การวิเคราะห์ทางด้านพลังงาน

1 การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิน้ำกลั่นบริสุทธิ์

ข้อมูลเบื้องต้น

ปริมาณน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 200 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับน้ำหนัก 0.2 kg

ณ สภาวะความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 °C น้ำกลั่นบริสุทธิ์อยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) มีค่า $h = 104.86 \text{ kJ/kg}$

ณ สภาวะเริ่มต้นที่ความดันสมบูรณ์ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงมีค่า 3.5 kg/cm^2 (343.23 kPa) อุณหภูมิ 25 °C น้ำกลั่นบริสุทธิ์อยู่ในสถานะของเหลวอัดตัว (Compress liquid)

ปริมาณจำเพาะ (Specific Volume) ของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงเท่ากับ $(v) 0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$

ณ สภาวะเป้าหมายที่อุณหภูมิ 200 °C น้ำกลั่นบริสุทธิ์อยู่ในสถานะของผสมอิ่มตัว มีค่า $u_f = 850.64 \text{ kJ/kg}$ $u_{fg} = 1744.66 \text{ kJ/kg}$ และคุณภาพไอน้ำ (x) เท่ากับ 0.0305

ตัวอย่าง การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ จากอุณหภูมิ 25 °C ไปถึง ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 °C

แนววิเคราะห์

$$Q = \Delta U = m (u_{fi} - u_{in})$$

$$u_{in} = h - Pv$$

$$u_{fi} = u_{@x} = u_f + x (u_{fg})$$

แทนค่า

$$u_{in} = 104.86 - (343.23) (0.005)$$

$$u_{in} = 103.14 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{fi} = 850.64 + (0.0305 \times 1744.66)$$

$$u_f = 903.78 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = \Delta U = 0.2 (903.85 - 103.14)$$

$$Q = \Delta U = 160.01 \text{ kJ}$$

ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มอุณหภูมิน้ำกลั่นบริสุทธิ์จาก 25 °C ให้ถึง 200 °C
ต้องใช้พลังงานความร้อน 160.01 kJ (0.16 MJ)



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ ง-1 สรุปผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ และประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ลำดับที่	อุณหภูมิ เป้าหมาย (°C)	ความดันสัมบูรณ์ ภายในถังปฏิกรณ์ ความดันสูง		m (kg)	u _{in} @ 25 °C (kJ/kg)	u _f (kJ/kg)	u _{fg} (kJ/kg)	ค่าคุณภาพ ไอน้ำ (X)	u _{ti} (kJ/kg)	Q (MJ)
		kg/cm ²	MPa							
1	200	25	2.45	0.2	103.14	850.64	1744.66	0.0305	903.78	0.16
2	250	52	5.10			1080.37	1522.00	0.0767	1197.11	0.22
3	300	94	9.22			1331.97	1230.99	0.1774	1550.40	0.29

2 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง

ข้อมูลเบื้องต้น

มวลของถังปฏิกรณ์แรงดันสูง 50 ปอนด์ (22.68 kg)

สแตนเลส เกรด 316 S.S. มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) 0.50 kJ/kg K

ณ สภาวะเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25 °C (298.15 K)

สภาวะอุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C (473.15 K)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์แรงดันสูง ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

แนววิเคราะห์

$$Q = m c_p (T_{fi} - T_{in})$$

แทนค่า

$$Q = 22.68 \times 0.5 \times (473.15 - 298.15)$$

$$Q = 1984.50 \text{ kJ (1.98 MJ)}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C มีค่า 1.98 MJ

ตารางที่ ง-2 สรุปผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง

ลำดับที่	อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	พลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง (MJ)
1	200	1.98
2	250	2.55
3	300	3.12

ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ข้อมูลเบื้องต้น

พลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากอุณหภูมิ 25 °C ไปถึง ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 °C มีค่า 0.16 MJ

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ มีค่า 5.40 MJ

ตัวอย่าง การคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

แนววิเคราะห์

ประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า = พลังงานที่ต้องการ / พลังงานที่ให้

แทนค่า

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า} = (0.16 / 5.40) \times 100$$

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า} = 2.96\%$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C มีค่า 2.96%

ตารางที่ จ-1 สรุปผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ลำดับที่	อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	พลังงานความร้อนที่น้ำกลั่นบริสุทธิ์ต้องการ (MJ)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้		ประสิทธิภาพระบบเตาปฏิกรณ์ (%)
			kWh	MJ	
1	200	0.16	1.50	5.40	2.96
2	250	0.22	1.90	6.84	3.20
3	300	0.29	2.30	8.28	3.49

ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

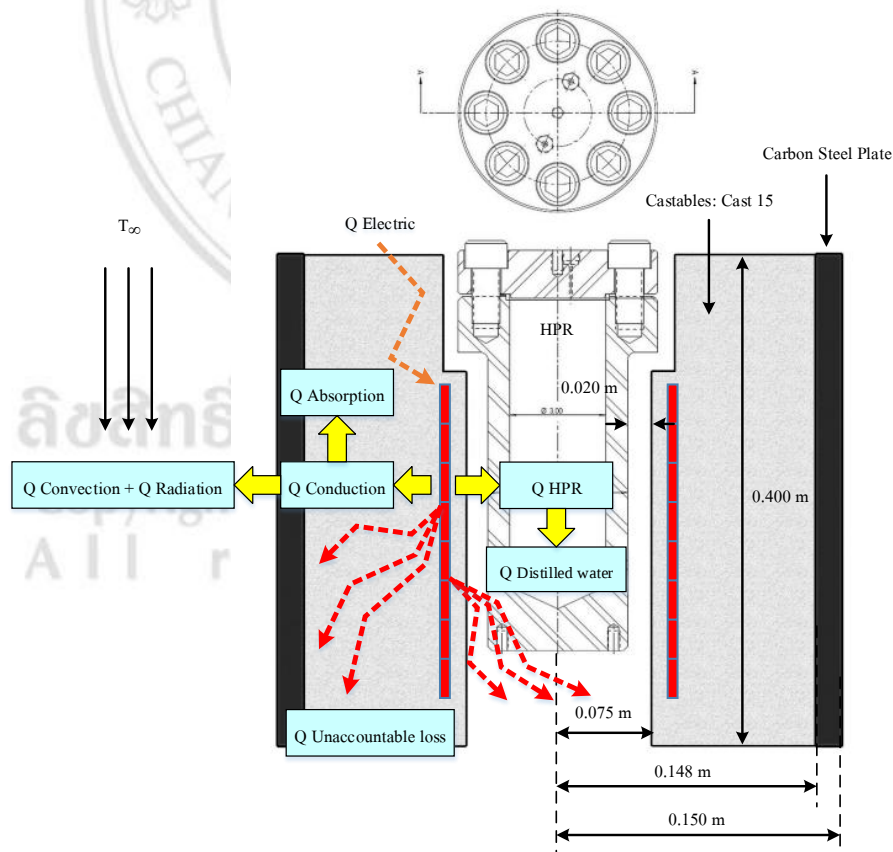
1 การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อน ขณะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่เงื่อนไขต่างๆ ข้อมูลเบื้องต้น

พลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากอุณหภูมิ 25 °C ไปถึง ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 °C มีค่า 0.16 MJ

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริสุทธิ์ มีค่า 5.40 MJ

ตัวอย่าง การคำนวณค่าความร้อนสูญเสียของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

แนววิเคราะห์



รูปที่ จ-1 แสดงรายละเอียดสมดุลพลังงานในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

จากรูปข้างต้นในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{Electric\ Input} = Q_{Distilled\ Water} + Q_{Total\ heat\ loss}$$

$$Q_{Total\ heat\ loss} = Q_{HPR} + Q_{Conduction}$$

$$Q_{Conduction} = Q_{Convection} + Q_{Radiation} + Q_{Absorption}$$

แทนค่า

$$Q_{Total\ heat\ loss} = Q_{Electric\ Input} - Q_{Distilled\ Water}$$

$$Q_{Total\ heat\ loss} = 5.40 - 0.16$$

$$Q_{Total\ heat\ loss} = 5.24\ MJ$$

ดังนั้นระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C มีค่า พลังงานสูญเสียรวม 5.24 MJ

ตารางที่ จ-1 แสดงสมดุลพลังงานในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ลำดับ ที่	อุณหภูมิ เป้าหมาย (°C)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทำปฏิกิริยา ณ ณ ระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยา (MJ)				พลังงาน ความ ร้อนที่ใช้ เพิ่ม อุณหภูมิ น้ำกลั่น บริสุทธิ์ (MJ)	$Q_{Total\ heat\ loss}$ ณ ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา (MJ)			
		ณ ที่เริ่ม นับเวลา ทำ ปฏิกิริยา	60 นาที	120 นาที	180 นาที		ณ ที่เริ่ม นับเวลา ทำ ปฏิกิริยา	60 นาที	120 นาที	180 นาที
1	200	5.40	5.76	6.84	8.28	0.16	5.24	5.60	6.68	8.12
2	250	6.84	7.56	9.36	11.16	0.22	6.68	7.40	9.20	11.00
3	300	8.28	9.72	11.16	12.96	0.29	8.12	9.56	11.00	12.80

2 การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียความร้อนในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าจะใช้สมมติฐานเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- ถึงปฏิกรณ์แรงดันสูง มีน้ำกลั่นบริสุทธิ์บรรจุอยู่ในปริมาตร 200 มิลลิลิตร และอุณหภูมิเริ่มต้นทุกจุดบนพื้นผิวของถึงปฏิกรณ์แรงดันสูงมีค่าเท่ากับ 25°C
- ถึงปฏิกรณ์แรงดันสูง จะได้รับพลังงานความร้อนจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าที่มีขนาดฮีตเตอร์ 3 กิโลวัตต์ ในอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที
- ไม่มีการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวด้านบน และด้านล่าง ที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic Fiber)
- ในการทดลองแต่ละครั้งจะติดตั้งถึงปฏิกรณ์ความดันสูง ไว้ภายในเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า โดยจะมีช่องว่างระหว่างเตาปฏิกรณ์แรงดันสูง และเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ประมาณ 0.02 เมตร ทั้งนี้ช่องว่างดังกล่าวจะตั้งสมมติฐานให้มีอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิฮีตเตอร์ไฟฟ้าไหลผ่านจึงทำให้เกิดการนำความร้อนผ่านผนังของถึงปฏิกรณ์ความดันสูงจากภายนอกเข้าสู่ภายใน เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำบริสุทธิ์ต่อไป
- ทั้งนี้จะไม่คำนึงถึงการแผ่รังสีความร้อนจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปยังพื้นที่ของถึงปฏิกรณ์แรงดันสูง อันเนื่องมาจากค่าดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และการนำความร้อนผ่านผนังของถึงปฏิกรณ์แรงดันสูง
- ในการคำนวณจะสมมติให้อุณหภูมิภายในถึงปฏิกรณ์แรงดันสูงมีค่าเท่ากันทุกจุด

ข้อมูลเบื้องต้น

พลังงานสูญเสียรวมของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C มีค่า 5.24 MJ

พลังงานความร้อนที่ให้แก่อถึงปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C มีค่า 1.98 MJ

พลังงานสูญเสียจะเกิดในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- พลังงานที่ต้องให้แก่ถึงปฏิกรณ์ความดันสูง
- การนำความร้อนผ่านผนังเตา (คอนกรีตทนไฟ และแผ่นเหล็กดัดขึ้นรูป)
- การกักเก็บความร้อนไว้ภายในผนังเตา

- การพาความร้อนแบบธรรมชาติ และการแผ่รังสีความร้อน ผ่านผิวด้านนอกของแผ่นเหล็กคัดขึ้นรูป
- พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้ (Unaccountable Loss)

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์จะอาศัยหลักการข้างต้น และคุณสมบัติเบื้องต้นของผนังเตา ที่ประกอบไปด้วยคอนกรีตทนไฟความหนา 8 เซนติเมตร และแผ่นเหล็กคัดขึ้นรูปความหนา 2 เซนติเมตร ทั้งนี้วัสดุแต่ละชนิดดังกล่าวมีคุณสมบัติดังนี้

ก. คอนกรีตทนไฟ (Castables: Cast 15)

- ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีค่า 0.71 W/m K ที่ 25 °C
- รัศมีจากจุดศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าถึงขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า (R_1) 0.075 เมตร
- รัศมีจากจุดศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าถึงผนังเตา (คอนกรีตทนไฟ) (R_2) 0.148 เมตร

ข. แผ่นเหล็กคัดขึ้นรูป (Carbon Steel Plate)

- ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีค่า 10.0 W/m K ที่ 25 °C
- รัศมีจากจุดศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าถึงผนังเตา (แผ่นเหล็กคัดขึ้นรูป) (R_3) 0.150 เมตร
- ความสูงของผนังเตาที่รับความร้อนจากขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า (L) 0.4 เมตร
- พื้นที่ผิวรับความร้อน ($A_{Carbon\ Steel\ Plate}$) $= 2 \pi r L_c = 2 \times \pi \times 0.15 \times 0.40 = 0.377 \text{ m}^2$

แนววิเคราะห์

$$Q_{Conduction} = Q_{Convection} + Q_{Radiation} + Q_{Absorption}$$

ก. การนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{Conduction}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการสูญเสียความร้อน จากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศาต่อวินาที ในเวลาที่ 30 ของการทดลอง โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 °C ทั้งนี้ได้กำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

- อุณหภูมิฮีตเตอร์ไฟฟ้า (T_{Heater}) 207.90 °C
- อุณหภูมิที่ผิวของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($T_{Outside Surface}$) 35.30 °C

แนววิเคราะห์

$$Q_{Conduction} = \frac{2\pi L (T_{Heater} - T_{Outside Surface})}{\frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{k_{Castables}} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{k_{Carbon Steel Plate}}}$$

แทนค่า

$$Q_{Conduction} = [2 \times \pi \times 0.4 \times (207.90 - 35.30)] / [\ln(0.148 / 0.075) / 0.71] + [\ln(0.150 / 0.148) / 10]$$

$$Q_{Conduction} = 449.34 \text{ Watt}$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียในรูปแบบการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศาต่อนาที ในเวลาที่ 30 ของการทดลอง โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 °C มีค่า 449.34 Watt

ข. การพาความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{Convection}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการสูญเสียความร้อน จากการพาความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศาต่อนาที ในเวลาที่ 30 ของการทดลอง โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200 °C ทั้งนี้ได้กำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

- อุณหภูมิที่ผิวของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($T_{Outside Surface}$) 35.30 °C (308.45 K)
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($T_{Surround}$) 25.00 °C (298.15 K)

แนววิเคราะห์

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{Surface} - T_{Surround})L^3}{\alpha\nu}$$

$$\overline{Nu}_{m,Plate}^{\frac{1}{2}} = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}]^{\frac{8}{27}}}$$

$$\xi = \frac{\left(\frac{L}{D}\right)}{Ra_L^{\frac{1}{4}}}$$

$$\overline{Nu}_{m,cyl} = \overline{Nu}_{m,plate} + [1 + (1.3 \xi^{0.9})]$$

$$h_{cyl} = \overline{Nu}_{m,cyl} \frac{k}{L}$$

$$Q_{conv} = h_{conv} A (T_{Outside\ surface} - T_{Surround})$$

แทนค่า

$$\text{อุณหภูมิอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย (T)} = (298.15 + 308.45) / 2 = 303.30 \text{ K}$$

$$\text{Thermal Expansion Coefficient } (\beta) = 3.30 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$$

$$\text{Prandtl's Number (Pr)} = 0.712$$

$$\text{Thermal Diffusivity } (\alpha) = 2.27 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Kinematic Viscosity } (\nu) = 1.61 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Thermal Conductivity (k)} = 2.64 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$$

$$Ra_L = [9.81 \times (3.30 \times 10^{-3}) \times (308.45 - 298.15) \times (0.40^3)] / [(1.61 \times 10^{-5} \times 2.27 \times 10^{-5})] = 5.86 \times 10^7$$

$$Nu_{m,plate} = [0.825 + [(0.387 \times (5.86 \times 10^7)^{1/6}) / ((1 + (0.492/0.712)^{9/16})^{8/27})]^2] = 52.49$$

$$\xi = (0.40/0.30) / (5.86 \times 10^7)^{1/4} = 0.015$$

$$Nu_{m,cyl} = 52.49 + [1 + (1.3 \times 0.015^{0.9})] = 53.52$$

$$h_{cyl} = 53.52 \times (2.64 \times 10^{-2} / 0.40) = 3.53 \text{ W/m}^2 \text{ C}$$

$$Q_{conv,cyl} = 3.53 \times 0.377 \times (308.45 - 298.15) = 13.72 \text{ Watt}$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียในรูปแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติผ่านผนังเตา และสิ่งแวดล้อม ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C ที่เวลาการทดลอง 30 นาที มีค่า 13.72 Watt

ก. การแผ่รังสีความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{\text{Radiation}}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการสูญเสียความร้อน จากการแผ่รังสีความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศาต่อวินาที ในเวลาที่ 30 ของการทดลอง โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200°C ทั้งนี้ได้กำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

- อุณหภูมิผิวของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($T_{\text{Outside Surface}}$) 35.30°C (308.45 K)
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{Surround}) 25.00°C (298.15 K)

แนววิเคราะห์

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_{\text{Outside Surface}}^4 - T_{\text{Surround}}^4)$$

แทนค่า

ค่า ϵ คือ ค่าความสามารถในการปลดปล่อย (Emissivity) สำหรับวัตถุใดๆ ที่ไม่ใช่วัตถุดำ ($\epsilon < 1$) มีค่า 0.07

ค่า σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$$Q_{\text{rad}} = 0.07 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.377 \times (308.45^4 - 298.15^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 1.72 \text{ Watt}$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียในรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นเหล็กคัดขึ้นรูปสู่ สิ่งแวดล้อม ณ

อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C ที่เวลาการทดลอง 30 นาที มีค่า 1.72 Watt

ง. การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{\text{Absorption}}$)

ตัวอย่าง การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศาต่อวินาที ในเวลาที่ 30 ของการทดลอง โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200°C ทั้งนี้ได้กำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

แนววิเคราะห์

$$Q_{\text{Absorption}} = Q_{\text{Conduction}} - Q_{\text{Convection}} - Q_{\text{Radiation}}$$

แทนค่า

$$Q_{Absorption} = 450.59 - 13.72 - 1.72$$

$$Q_{Absorption} = 435.15 \text{ Watt}$$

ดังนั้น, การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศาต่อนาที ในเวลาที่ 30 ของการทดลอง โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 200°C มีค่า 435.15 Watt

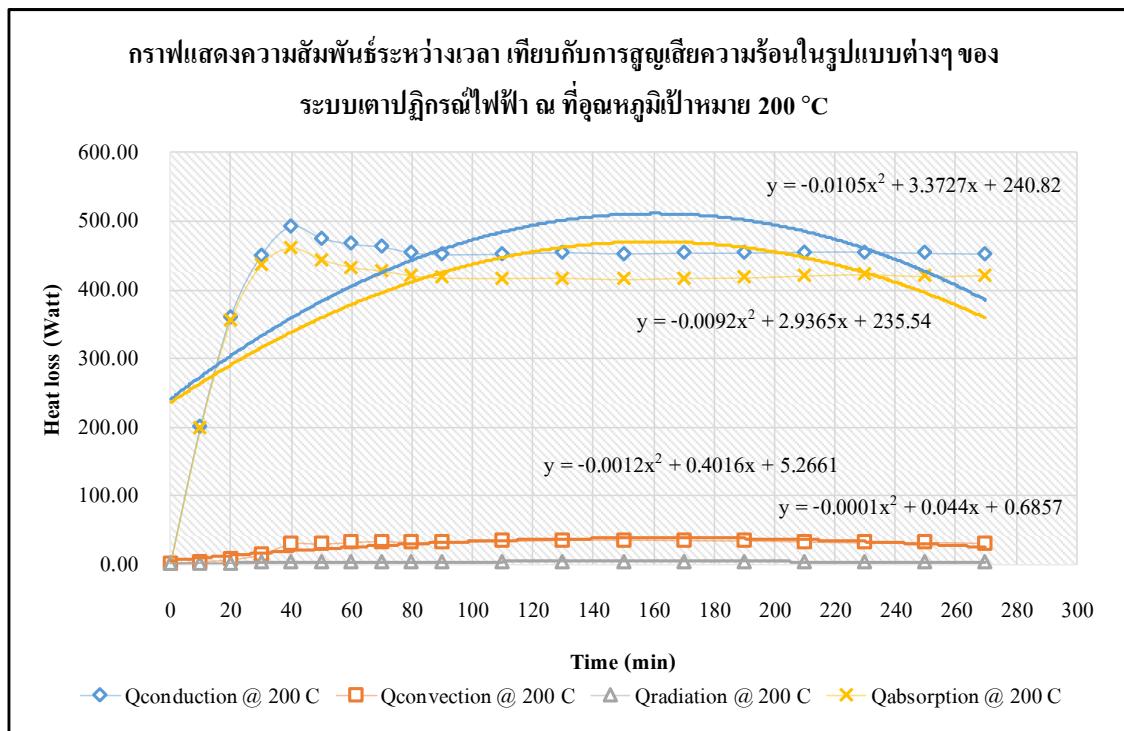
ตารางที่ จ-2 แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C ที่เวลาต่างๆ

Time	T inside HPR (T_{Inside} HPR)	T heater (T_{Heater})	T outside surface ($T_{Outside}$ Surface)	Conduction ($Q_{Conduction}$)	Convection heat transfer coefficient (h_3)	Convection ($Q_{Convection}$)	Radiation ($Q_{Radiation}$)	Absorption ($Q_{Absorption}$)
min	C	C	C	W	W/m ² K	W	W	W
0	23.83	26.33	26.60	0.09	1.99	0.98	0.21	-1.10
10	41.10	105.77	28.60	200.89	2.64	3.58	0.58	197.29
20	87.20	169.17	30.60	360.74	2.98	6.29	0.91	354.54
30	145.10	207.90	35.30	449.34	3.53	13.72	1.72	435.15
40	197.13	232.77	43.70	492.21	4.17	29.38	3.26	460.94
50	207.27	225.97	43.60	474.77	4.15	29.13	3.24	443.72
60	204.47	223.93	44.80	466.35	4.23	31.60	3.47	432.58
70	205.37	222.97	45.40	462.27	4.27	32.83	3.58	427.15
80	202.90	219.03	44.70	453.85	4.23	31.38	3.45	420.29
90	202.33	217.73	44.90	451.16	4.24	31.83	3.49	417.10
110	202.53	219.07	45.50	451.86	4.28	33.05	3.60	416.46
130	203.33	221.03	46.30	454.03	4.32	34.68	3.76	416.85
150	202.80	219.27	46.50	452.38	4.34	35.15	3.80	414.69

ตารางที่ จ-2 (ต่อ) แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C ที่เวลาต่างๆ

Time	T inside HPR (T_{Inside} HPR)	T heater (T_{Heater})	T outside surface ($T_{Outside}$ Surface)	Conduction ($Q_{Conduction}$)	Convection heat transfer coefficient (h_3)	Convection ($Q_{Convection}$)	Radiation ($Q_{Radiation}$)	Absorption ($Q_{Absorption}$)
min	C	C	C	W	W/m ² K	W	W	W
170	202.57	218.60	46.10	453.42	4.31	34.27	3.72	416.69
190	202.93	219.07	45.90	453.42	4.30	33.89	3.68	417.11
210	202.97	219.57	45.20	454.81	4.26	32.42	3.54	420.11
230	202.73	218.77	44.50	454.98	4.21	30.98	3.41	421.86
250	203.00	218.83	44.80	453.07	4.23	31.60	3.47	419.27
270	202.30	217.77	44.10	452.12	4.19	30.19	2.55	420.65

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



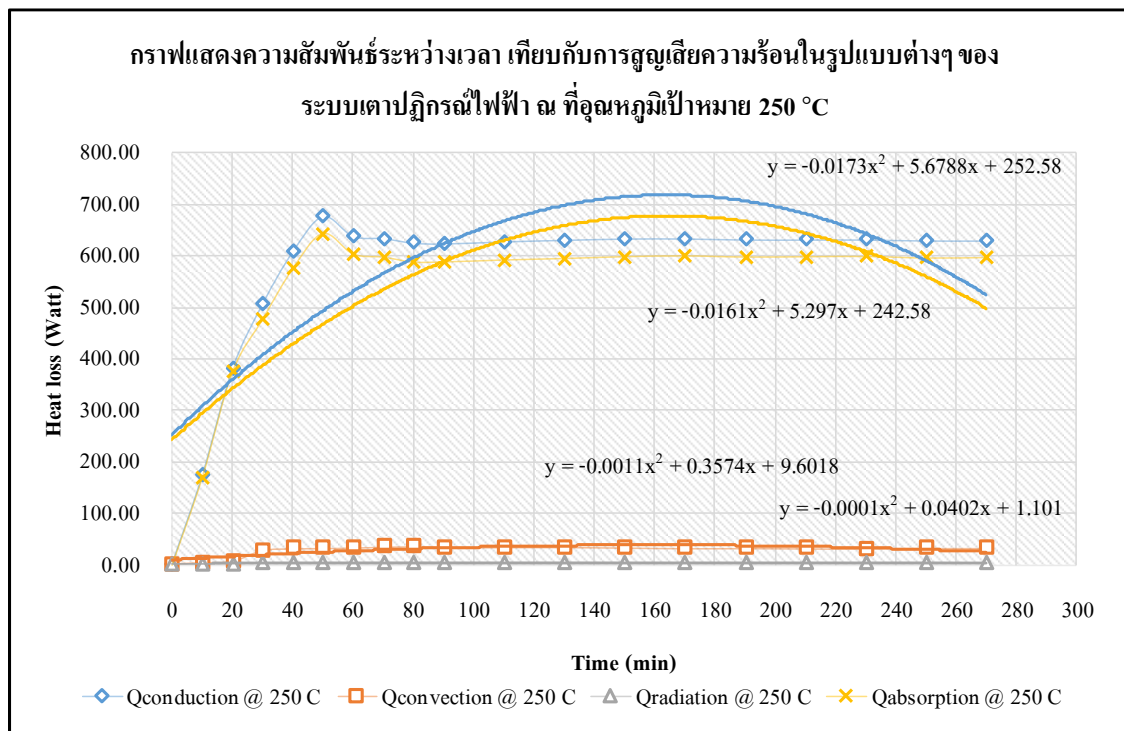
รูปที่ จ-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

ตารางที่ จ-3 แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 250 °C ที่เวลาต่างๆ

Time	T inside HPR ($T_{Inside\ HPR}$)	T heater (T_{Heater})	T outside surface ($T_{Outside\ Surface}$)	Conduction ($Q_{Conduction}$)	Convection heat transfer coefficient (h)	Convection ($Q_{Convection}$)	Radiation ($Q_{Radiation}$)	Absorption ($Q_{Absorption}$)
min	C	C	C	W	W/m ² K	W	W	W
0	24.07	27.47	26.90	1.48	2.21	1.58	0.30	-0.41
10	37.20	95.47	28.90	173.30	2.70	3.96	0.63	169.19
20	84.20	176.70	30.80	379.83	3.01	6.58	0.95	373.36
30	140.67	237.57	43.20	506.01	4.14	28.38	3.16	475.87
40	197.80	278.13	44.80	607.45	4.23	31.60	3.47	574.08

ตารางที่ จ-3 (ต่อ) แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 250 °C ที่เวลาต่างๆ

Time	T inside HPR (T_{Inside} HPR)	T heater (T_{Heater})	T outside surface ($T_{Outside}$ Surface)	Conduction ($Q_{Conduction}$)	Convection heat transfer coefficient (h)	Convection ($Q_{Convection}$)	Radiation ($Q_{Radiation}$)	Absorption ($Q_{Absorption}$)
min	C	C	C	W	W/m ² K	W	W	W
50	242.07	304.87	45.10	676.27	4.25	32.21	3.53	642.41
60	258.37	290.57	45.60	637.74	4.28	33.24	3.62	602.66
70	250.07	289.70	46.40	633.40	4.32	34.89	3.78	596.50
80	252.07	286.63	46.70	624.63	4.34	35.51	3.84	587.03
90	250.93	285.20	45.90	622.98	4.30	33.85	3.68	587.19
110	252.10	286.87	46.00	627.06	4.31	34.09	3.70	591.02
130	252.10	288.13	46.10	630.10	4.31	34.27	3.72	593.87
150	252.17	288.57	45.60	632.53	4.28	33.25	3.62	597.42
170	251.77	288.03	45.00	632.70	4.25	32.01	3.51	598.95
190	251.60	287.37	45.10	630.71	4.25	32.21	3.53	596.73
210	251.77	287.03	44.80	630.62	4.23	31.60	3.47	597.31
230	252.23	286.87	44.60	630.71	4.22	31.18	3.43	597.86
250	252.93	286.63	45.10	628.80	4.25	32.21	3.53	594.81
270	252.87	286.60	45.10	628.71	4.25	32.21	2.55	595.71



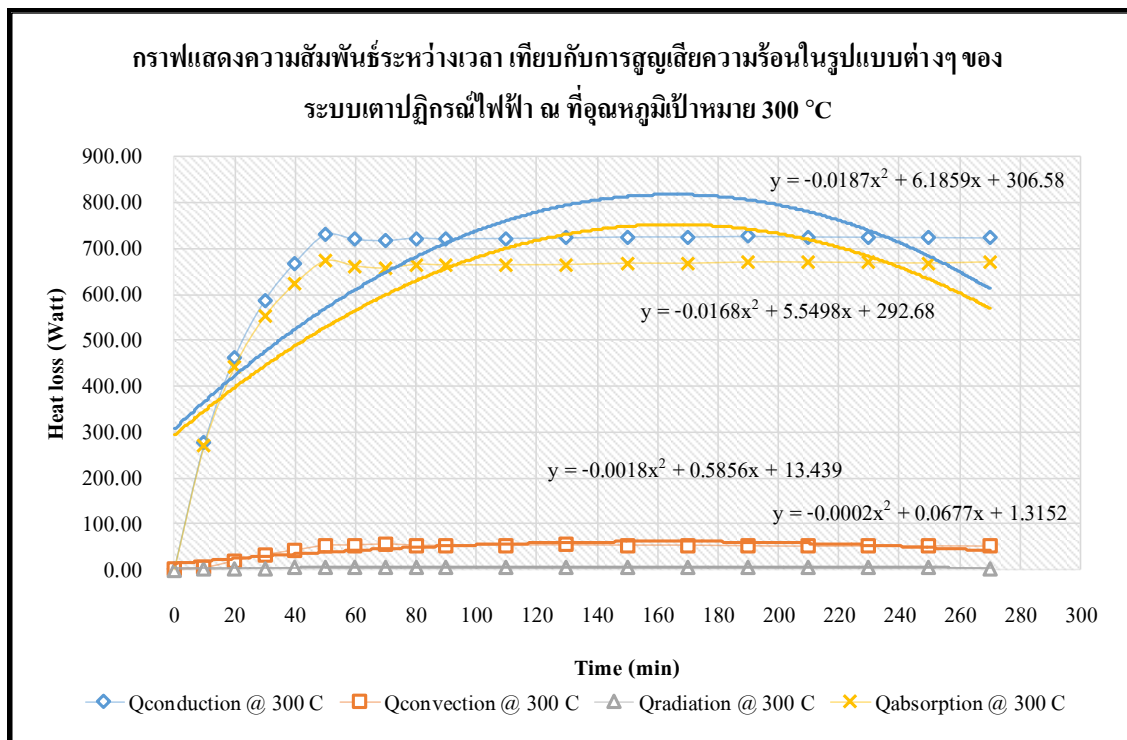
รูปที่ น-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 250 °C

ตารางที่ น-4 แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C ที่เวลาต่างๆ

Time	T inside HPR ($T_{Inside\ HPR}$)	T heater (T_{Heater})	T outside surface ($T_{Outside\ Surface}$)	Conduction ($Q_{Conduction}$)	Convection heat transfer coefficient (h)	Convection ($Q_{Convection}$)	Radiation ($Q_{Radiation}$)	Absorption ($Q_{Absorption}$)
min	C	C	C	W	W/m ² K	W	W	W
0	23.30	27.13	26.80	0.87	2.18	1.48	0.29	-0.90
10	34.27	135.97	29.80	276.39	2.86	5.17	0.78	271.21
20	82.37	216.17	38.50	462.53	3.81	19.39	2.29	442.14
30	139.23	270.80	45.40	586.80	4.27	32.83	3.58	552.02
40	195.67	307.10	50.20	668.80	4.52	42.98	4.53	623.15

ตารางที่ จ-4 (ต่อ) แสดงพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C ที่เวลาต่างๆ

Time	T inside HPR (T_{Inside} HPR)	T heater (T_{Heater})	T outside surface ($T_{Outside}$ Surface)	Conduction ($Q_{Conduction}$)	Convection heat transfer coefficient (h)	Convection ($Q_{Convection}$)	Radiation ($Q_{Radiation}$)	Absorption ($Q_{Absorption}$)
min	C	C	C	W	W/m ² K	W	W	W
50	242.57	335.00	54.80	729.46	4.73	53.12	5.48	672.89
60	289.37	331.53	55.20	719.40	4.75	54.03	5.57	661.80
70	303.10	331.60	56.10	717.23	4.79	56.18	5.76	657.29
80	305.37	332.57	55.00	722.61	4.74	53.58	5.53	665.52
90	303.20	331.70	54.80	720.87	4.73	53.12	5.48	664.27
110	305.27	332.40	55.10	721.91	4.74	53.75	5.55	664.63
130	306.07	332.97	55.30	722.87	4.75	54.25	5.59	665.04
150	306.03	333.53	55.00	725.12	4.74	53.58	5.53	668.04
170	305.87	333.43	55.00	724.86	4.74	53.58	5.53	667.78
190	305.93	333.33	54.40	726.16	4.70	52.14	5.40	670.65
210	305.67	332.47	54.00	724.95	4.69	51.32	5.32	670.33
230	306.13	332.47	54.20	724.43	4.70	51.77	5.36	669.32
250	305.93	332.27	54.30	723.65	4.70	51.95	5.38	668.34
270	304.97	331.77	54.10	722.87	4.69	51.45	2.55	670.88



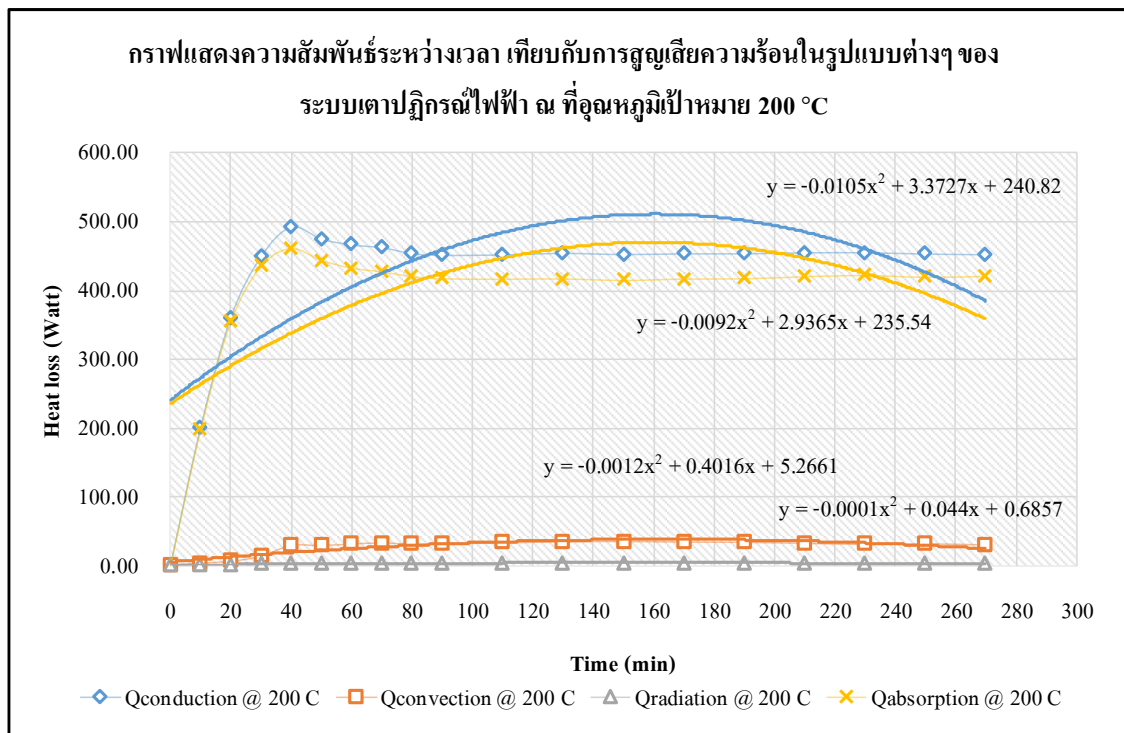
รูปที่ จ-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 300 °C

3 การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนรวม

จากสมการสมดุลพลังงานในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าดังต่อไปนี้

$$Q_{Total\ Conduction} = Q_{Total\ Convection} + Q_{Total\ Radiation} + Q_{Total\ Absorption}$$

การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนรวม จากสมการข้างต้นจะสามารถหาค่าการสูญเสียความร้อนรวมในแต่ละรูปแบบทั้ง 4 รูปแบบ คือ 1. การนำความร้อน 2. การพาความร้อน 3. การแผ่รังสีความร้อน และ 4. การสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ได้จากพื้นที่ใต้กราฟของสมการเส้นแนวโน้มการสูญเสียความร้อน ระหว่างเวลา กับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ ๕-5 สมการเส้นแนวโน้มของการสูญเสียความร้อน ระหว่างเวลา เทียบกับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

ก. การนำความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{Total\ Conduction}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการนำความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถึงปฏิกิริยาความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200 °C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา) โดยมีสมการเส้นแนวโน้มดังนี้

$$y = -0.0105x^2 + 3.3727x + 240.82$$

แนววิเคราะห์

$$Q_{Total\ Conduction} = \int_0^{50} -0.0105x^2 + 3.3727x + 240.82 \, dx$$

แทนค่า

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการข้างต้น ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 50 นาที จะได้สมการ

$$Q_{Total\ Conduction} = (-0.0105 x^3 / 3) + (3.3727 x^2 / 2) + (240.82 x) \Big|_0^{50}$$

$$Q_{Total\ Conduction} = [(-0.0105 \times 50^3 / 3) + (3.3727 \times 50^2 / 2) + (240.82 \times 50)] - [(-0.0105 \times 0^3 / 3) + (3.3727 \times 0^2 / 2) + (240.82 \times 0)]$$

$$Q_{Total\ Conduction} = 0.95\ MJ$$

สำหรับในการทดลองระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถึงปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200 °C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา) จะมีพลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 0.95 MJ

ข. การพาความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{Total\ Convection}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการพาความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถึงปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200 °C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา) โดยมีสมการเส้นแนวโน้มดังนี้

$$y = -0.0012x^2 + 0.4016x + 5.2661$$

แนววิเคราะห์

$$Q_{Total\ Convection} = \int_0^{50} -0.0012x^2 + 0.4016x + 5.2661\ dx$$

แทนค่า

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการข้างต้น ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 50 นาที จะได้สมการ

$$Q_{Total\ Convection} = (-0.0012 \times 50^3 / 3) + (0.4016 \times 50^2 / 2) + (5.2661 \times 50) - [(-0.0012 \times 0^3 / 3) + (0.4016 \times 0^2 / 2) + (5.2661 \times 0)]$$

$$Q_{Total\ Convection} = [(-0.0012 \times 50^3 / 3) + (0.4016 \times 50^2 / 2) + (5.2661 \times 50)] - [(-0.0012 \times 0^3 / 3) + (0.4016 \times 0^2 / 2) + (5.2661 \times 0)]$$

$$Q_{Total\ Convection} = 0.04\ MJ$$

สำหรับในการทดลองระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200°C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา) จะมีพลังงานสูญเสียจากการพาความร้อน รวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 0.04 MJ

ก. การแผ่รังสีความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{\text{Total Radiation}}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการแผ่รังสีความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200°C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา) โดยมีสมการเส้นแนวโน้มดังนี้

$$y = -0.0001x^2 + 0.044x + 0.6857$$

แนววิเคราะห์

$$Q_{\text{Total Radiation}} = \int_0^{50} -0.0001x^2 + 0.044x + 0.6857 \, dx$$

แทนค่า

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการข้างต้น ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 50 นาที จะได้สมการ

$$Q_{\text{Total Radiation}} = (-0.0001 x^3 / 3) + (0.044 x^2 / 2) + (0.6857 x) \Big|_0^{50}$$

$$Q_{\text{Total Radiation}} = [(-0.0001 x 50^3 / 3) + (0.044 x 50^2 / 2) + (0.6857 x 50)] - [(-0.0001 x 0^3 / 3) + (0.044 x 0^2 / 2) + (0.6857 x 0)]$$

$$Q_{\text{Total Radiation}} = 0.01\text{ MJ}$$

สำหรับในการทดลองระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200°C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มต้นเวลาทำปฏิกิริยา) จะมีพลังงานสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 0.01 MJ

ง. การสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ($Q_{Total\ Absorption}$)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าการสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้ อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200 °C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่ เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา) โดยมีสมการเส้นแนวโน้มดังนี้

$$y = -0.0092x^2 + 2.9365x + 235.54$$

แนววิเคราะห์

$$Q_{Total\ Absorption} = \int_0^{50} -0.0092x^2 + 2.9365x + 235.54 \, dx$$

แทนค่า

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการข้างต้น ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 50 นาที จะได้สมการ

$$Q_{Total\ Absorption} = (-0.0092 x^3 / 3) + (2.9365 x^2 / 2) + (235.54 x) \Big|_0^{50}$$

$$Q_{Total\ Absorption} = [(-0.0092 x 50^3 / 3) + (2.9365 x 50^2 / 2) + (235.54 x 50)] - [(-0.0092 x 0^3 / 3) + (2.9365 x 0^2 / 2) + (235.54 x 0)]$$

$$Q_{Total\ Absorption} = 0.90 \, MJ$$

สำหรับการทดลองระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 4 องศาต่อนาที จะต้องใช้เวลาประมาณ 50 นาที จึงทำให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงถึงเป้าหมายที่ 200 °C (ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ณ ที่เริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยา) จะมีพลังงานสูญเสียจากการสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า 0.90 MJ

4 สรุปผลการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนรวมในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ก. การนำความร้อน

ตารางที่ จ-5 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

ลำดับที่	อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	$Q_{Total\ Conduction}$ ณ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (MJ)			
		ณ ที่เริ่ม นับเวลาทำ ปฏิกิริยา	60 นาที	120 นาที	180 นาที
1	200	0.95	2.53	4.35	6.12
2	250	1.14	3.27	5.80	8.29
3	300	1.34	3.77	6.65	9.50

ข. การพาความร้อน

ตารางที่ จ-6 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

ลำดับที่	อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	$Q_{Total\ Convection}$ ณ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (MJ)			
		ณ ที่เริ่ม นับเวลาทำ ปฏิกิริยา	60 นาที	120 นาที	180 นาที
1	200	0.04	0.15	0.28	0.42
2	250	0.05	0.16	0.30	0.43
3	300	0.08	0.25	0.47	0.68

ค. การแผ่รังสีความร้อน

ตารางที่ ฉ-7 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนรวมผ่านผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

ลำดับที่	อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	$Q_{Total\ Radiation}$ ณ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (MJ)			
		ณ ที่เริ่ม นับเวลาทำ ปฏิกิริยา	60 นาที	120 นาที	180 นาที
1	200	0.01	0.02	0.04	0.05
2	250	0.01	0.02	0.04	0.05
3	300	0.01	0.03	0.05	0.08

ง. การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า

ตารางที่ ฉ-8 แสดงการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนสะสมรวมภายในผนังของระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

ลำดับที่	อุณหภูมิเป้าหมาย (°C)	$Q_{Total\ Absorption}$ ณ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (MJ)			
		ณ ที่เริ่ม นับเวลาทำ ปฏิกิริยา	60 นาที	120 นาที	180 นาที
1	200	0.90	2.38	4.04	5.67
2	250	1.08	3.10	5.48	7.84
3	300	1.25	3.50	6.15	8.76

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะสามารถพิจารณาได้ออกเป็น 4 หัวข้อหลัก คือ 1. พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น 2. พลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย 3. พลังงานสูญเสีย และ 4. พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้ ทั้งนี้รายละเอียดจากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

1 พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น

พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น จะประกอบไปด้วยพลังงานที่สำคัญ คือ พลังงานจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ น้ำกลั่นบริสุทธิ์ และในส่วนของพลังงานที่ได้จากก๊าซไนโตรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานต่างๆ ข้างต้น ดังแสดงรายละเอียดในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข-1 พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น

ลำดับที่	รายละเอียด	พลังงาน (MJ)
1	พลังงานจากเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	5.40 – 12.96
2	พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	0.47
3	น้ำกลั่นบริสุทธิ์	0.02
4	ก๊าซไนโตรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต	N/A
รวมทั้งหมด		5.87 – 13.44

2 พลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย

พลังงานหลัก 2 ชนิด ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะประกอบไปด้วยพลังงานที่ได้จาก 1. เชื้อเพลิงเหลว และ 2. เชื้อเพลิงแข็ง ส่วนพลังงานอื่นๆ เช่น ก๊าซ น้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ เป็นต้น จะไม่นำมาพิจารณาในการหาสมดุลพลังงานอันเนื่องมาจากพลังงานดังกล่าวมีค่าที่น้อยมาก และไม่นับสำคัญต่อการพิจารณา ทั้งนี้ได้แสดงรายละเอียดต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข-2 พลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย

ลำดับที่	รายละเอียด	พลังงาน (MJ)
1	เชื้อเพลิงเหลว	0.13 – 0.27
2	เชื้อเพลิงแข็ง	0.17 – 0.25
3	ก๊าซ	N/A
4	น้ำ และสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้	N/A
รวมทั้งหมด		0.30 – 0.48

3 พลังงานสูญเสีย

พลังงานสูญเสียหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการทดลอง จะประกอบไปด้วย 1. พลังงานในการเปลี่ยนสถานะน้ำกลั่นบริสุทธิ์จากของเหลวอัดตัวไปเป็นของผสมอัดตัว 2. พลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง และ 3. การสูญเสียความร้อนรวมในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ จะสามารถหาได้จากการตรวจวัด คำนวณ และวิเคราะห์ผล ดังแสดงค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ ต่อไปนี้

ตารางที่ ข-3 พลังงานสูญเสีย

ลำดับที่	รายละเอียด	พลังงาน (MJ)
1	พลังงานในการเปลี่ยนสถานะน้ำกลั่นบริสุทธิ์จากของเหลวอัดตัวไปเป็นของผสมอัดตัว	0.16 – 0.29
2	พลังงานความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์ความดันสูง	1.98 – 3.12
3	การสูญเสียความร้อนรวมในระบบเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	
	3.1 การนำความร้อน	0.95 – 9.50
	1) การพาความร้อน	0.04 – 0.68
	2) การแผ่รังสีความร้อน	0.01 – 0.08
	3) การสูญเสียความร้อนสะสมภายในผนังเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า	0.90 – 8.76
รวมทั้งหมด		3.09 – 12.91

4 พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้

พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้ (Unaccountable Loss) สามารถคำนวณหาได้จาก ความแตกต่างระหว่าง พลังงานที่ใช้ตอนเริ่มต้น กับพลังงานที่ได้ตอนสุดท้าย และพลังงานสูญเสีย ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ดังแสดงแนวทางการวิเคราะห์ในสมการต่อไปนี้

$$Q_{Unaccountable\ loss} = Q_{Total\ Energy\ Input} - Q_{Total\ Energy\ Output} - Q_{Total\ heat\ loss}$$

ตารางที่ ช-4 พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้

ลำดับที่	รายละเอียด	พลังงาน (MJ)
1	พลังงานสูญเสียที่วัดไม่ได้	0.02 – 3.65

ตารางที่ ข-5 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)

Temperature (°C)	Time (min)	Gauge Pressure		Absolute Pressure (kPa)	Absolute Pressure (Theory) (kPa)	INPUT					Total Energy INPUT (MJ)
		kg/cm ²	kPa			kWh	MJ	CNS		Total Energy (MJ)	
								Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
25	-	-	-	101.325	3	-	-	20.34	22.98	0.47	0.47
200	0	23	2256	2357	1554	1.50	5.40	20.50	22.98	0.47	5.87
250	0	52	5099	5201	3973	1.90	6.84	20.53	22.98	0.47	7.31
300	0	94	9218	9320	8581	2.30	8.28	20.47	22.98	0.47	8.75
200	60	23	2256	2357	1554	1.60	5.76	20.42	22.98	0.47	6.23
250	60	52	5099	5201	3973	2.10	7.56	20.43	22.98	0.47	8.03
300	60	94	9218	9320	8581	2.70	9.72	20.52	22.98	0.47	10.19
200	120	23	2256	2357	1554	1.90	6.84	20.39	22.98	0.47	7.31
250	120	52	5099	5201	3973	2.60	9.36	20.54	22.98	0.47	9.83
300	120	94	9218	9320	8581	3.10	11.16	20.36	22.98	0.47	11.63
200	180	23	2256	2357	1554	2.30	8.28	20.51	22.98	0.47	8.75
250	180	52	5099	5201	3973	3.10	11.16	20.38	22.98	0.47	11.63

ตารางที่ ข-5 (ต่อ) การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)

Temperature (°C)	Time (min)	Gauge Pressure		Absolute Pressure (kPa)	Absolute Pressure (Theory) (kPa)	INPUT					Total Energy INPUT (MJ)
		kg/cm ²	kPa			kWh	MJ	CNS		Total Energy (MJ)	
								Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
300	180	94	9218	9320	8581	3.60	12.96	20.38	22.98	0.47	13.43

ตารางที่ ข-6 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)

Temperature (°C)	Time (min)	OUTPUT						Total Energy OUTPUT (MJ)
		Liquid fuel		Total Liquid fuel Energy (MJ)	Solid fuel		Total Solid fuel Energy (MJ)	
		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
25	-	6.12	38.73	0.24	13.25	23.72	0.31	0.55
200	0	6.63	40.90	0.27	7.67	26.73	0.21	0.48
250	0	5.23	40.26	0.21	6.49	30.80	0.20	0.41
300	0	4.80	39.51	0.19	5.62	34.91	0.20	0.39
200	60	6.24	43.07	0.27	7.64	27.13	0.21	0.48
250	60	5.81	40.39	0.23	5.70	33.06	0.19	0.42
300	60	4.07	38.88	0.16	5.48	35.60	0.19	0.35

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)

Temperature (°C)	Time (min)	OUTPUT						Total Energy OUTPUT (MJ)
		Liquid fuel		Total Liquid fuel Energy (MJ)	Solid fuel		Total Solid fuel Energy (MJ)	
		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
200	120	5.82	39.07	0.23	7.44	28.00	0.21	0.44
250	120	4.95	38.83	0.19	5.17	33.30	0.17	0.36
300	120	4.08	40.81	0.17	4.85	36.03	0.17	0.34
200	180	6.17	40.09	0.25	7.26	28.70	0.21	0.46
250	180	4.77	38.97	0.19	5.07	33.88	0.17	0.36
300	180	3.30	40.33	0.13	4.61	36.12	0.17	0.30

ตารางที่ ข-7 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)

Temperature (°C)	Time (min)	Energy Efficiency			Energy loss			Total Energy loss (MJ)	Unaccountable loss (MJ)
		Liquid fuel	Solid fuel	Total	HPR (MJ)	Distilled Water (MJ)	Conduction (MJ)		
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	0	4.62%	3.49%	8.11%	1.98	0.16	0.95	3.09	2.31

ตารางที่ ข-7 (ต่อ) การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา)

Temperature (°C)	Time (min)	Energy Efficiency			Energy loss			Total Energy loss (MJ)	Unaccountable loss (MJ)
		Liquid fuel	Solid fuel	Total	HPR (MJ)	Distilled Water (MJ)	Conduction (MJ)		
250	0	2.88%	2.73%	5.61%	2.55	0.22	1.14	3.91	2.99
300	0	2.17%	2.24%	4.41%	3.12	0.29	1.34	4.75	3.62
200	60	4.32%	3.33%	7.64%	1.98	0.16	2.53	4.67	1.08
250	60	2.92%	2.35%	5.27%	2.55	0.22	3.27	6.04	1.57
300	60	1.55%	1.91%	3.47%	3.12	0.29	3.77	7.18	2.66
200	120	3.11%	2.85%	5.96%	1.98	0.16	4.35	6.49	0.38
250	120	1.96%	1.75%	3.71%	2.55	0.22	5.80	8.57	0.90
300	120	1.43%	1.50%	2.93%	3.12	0.29	6.65	10.06	1.22
200	180	2.83%	2.38%	5.21%	1.98	0.16	6.12	8.26	0.03
250	180	1.60%	1.48%	3.07%	2.55	0.22	8.29	11.06	0.21
300	180	0.99%	1.24%	2.23%	3.12	0.29	9.50	12.91	0.22

ตารางที่ ข-8 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

Temperature (°C)	Time (min)	Gauge Pressure		Absolute Pressure (kPa)	Absolute Pressure (Theory) (kPa)	INPUT					Total Energy INPUT (MJ)
		kg/cm ²	kPa			kWh	MJ	CNS		Total Energy (MJ)	
								Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
25	-	-	-	101.325	3	-	-	20.34	22.98	0.47	0.47
200	0	23	2256	2357	1554	1.50	5.40	20.69	22.98	0.48	5.88
250	0	52	5099	5201	3973	1.90	6.84	20.89	22.98	0.48	7.32
300	0	94	9218	9320	8581	2.30	8.28	20.46	22.98	0.47	8.75
200	60	23	2256	2357	1554	1.60	5.76	20.86	22.98	0.48	6.24
250	60	52	5099	5201	3973	2.10	7.56	20.61	22.98	0.47	8.03
300	60	94	9218	9320	8581	2.70	9.72	20.44	22.98	0.47	10.19
200	120	23	2256	2357	1554	1.90	6.84	20.59	22.98	0.47	7.31
250	120	52	5099	5201	3973	2.60	9.36	20.71	22.98	0.48	9.84
300	120	94	9218	9320	8581	3.10	11.16	20.72	22.98	0.48	11.64
200	180	23	2256	2357	1554	2.30	8.28	20.84	22.98	0.48	8.76
250	180	52	5099	5201	3973	3.10	11.16	20.81	22.98	0.48	11.64

ตารางที่ ข-8 (ต่อ) การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

Temperature (°C)	Time (min)	Gauge Pressure		Absolute Pressure (kPa)	Absolute Pressure (Theory) (kPa)	INPUT					Total Energy INPUT (MJ)
		kg/cm ²	kPa			kWh	MJ	CNS		Total Energy (MJ)	
								Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
300	180	94	9218	9320	8581	3.60	12.96	20.81	22.98	0.48	13.44

ตารางที่ ข-9 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

Temperature (°C)	Time (min)	OUTPUT						Total Energy OUTPUT (MJ)
		Liquid fuel		Total Liquid fuel Energy (MJ)	Solid fuel		Total Solid fuel Energy (MJ)	
		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
25	-	6.12	38.73	0.24	13.25	23.72	0.31	0.55
200	0	5.72	41.47	0.24	8.87	27.16	0.24	0.48
250	0	5.59	41.03	0.23	5.69	31.24	0.18	0.41
300	0	4.78	39.34	0.19	4.75	35.08	0.17	0.35
200	60	5.44	43.74	0.24	8.82	28.08	0.25	0.49
250	60	5.09	42.53	0.22	5.19	31.75	0.16	0.38

ตารางที่ ข-9 (ต่อ) การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

Temperature (°C)	Time (min)	OUTPUT						Total Energy OUTPUT (MJ)
		Liquid fuel		Total Liquid fuel Energy (MJ)	Solid fuel		Total Solid fuel Energy (MJ)	
		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		Mass (g)	HHV (MJ/kg)		
300	60	4.87	40.53	0.20	4.46	36.06	0.16	0.36
200	120	5.25	42.53	0.22	8.13	28.81	0.23	0.46
250	120	4.98	39.81	0.20	4.81	34.79	0.17	0.37
300	120	4.81	43.16	0.21	3.79	37.65	0.14	0.35
200	180	5.61	41.59	0.23	7.85	30.78	0.24	0.47
250	180	5.08	39.49	0.20	4.06	35.62	0.14	0.35
300	180	4.73	41.06	0.19	3.65	37.82	0.14	0.33

ตารางที่ ข-10 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

[illegible]

ตารางที่ ข-10 (ต่อ) การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต)

Temperature (°C)	Time (min)	Energy Efficiency			Energy loss			Total Energy loss (MJ)	Unaccountable loss (MJ)
		Liquid fuel	Solid fuel	Total	HPR (MJ)	Distilled Water (MJ)	Conduction (MJ)		
200	0	4.04%	4.10%	8.14%	1.98	0.16	0.95	3.09	2.31
250	0	3.13%	2.43%	5.56%	2.55	0.22	1.14	4.67	3.00
300	0	2.15%	1.90%	4.05%	3.12	0.29	1.34	6.49	3.65
200	60	3.82%	3.97%	7.79%	1.98	0.16	2.53	8.26	1.08
250	60	2.69%	2.05%	4.74%	2.55	0.22	3.27	3.91	1.61
300	60	1.94%	1.58%	3.52%	3.12	0.29	3.77	6.04	2.65
200	120	3.05%	3.20%	6.26%	1.98	0.16	4.35	8.57	0.37
250	120	2.02%	1.70%	3.72%	2.55	0.22	5.80	11.06	0.90
300	120	1.79%	1.23%	3.01%	3.12	0.29	6.65	4.75	1.22
200	180	2.66%	2.76%	5.42%	1.98	0.16	6.12	7.18	0.02
250	180	1.72%	1.24%	2.97%	2.55	0.22	8.29	10.06	0.24
300	180	1.44%	1.03%	2.47%	3.12	0.29	9.50	12.91	0.20

ภาคผนวก ซ.

การวิเคราะห์ค่าความเค้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

1 การวิเคราะห์ค่าความเค้นภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง

ข้อมูลเบื้องต้น

ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C ภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูงมีความดันเกจ (P) 24 kg/cm² (2.35 MPa)

มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Inside Diameter) 3.00 นิ้ว ภายในนอก (Outside Diameter) 4.38 นิ้ว (0.1112 m) ดังนั้นจะมีรัศมีภายใน (r_i) 1.5 นิ้ว (0.0381 m) และความหนาของถังปฏิกรณ์ความดันสูงประมาณ (t) 0.69 นิ้ว (0.0175 m)

ตัวอย่าง การคำนวณค่าความเค้นในแนวเส้นรอบวง และในแนวแกนภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C

แนววิเคราะห์ (ค่าความเค้นในแนวเส้นรอบวง)

$$\sigma_{tc} = \frac{Pr_i}{t}$$

แทนค่า

$$\sigma_{tc} = (2.35 \times 0.0381) / 0.0175$$

$$\sigma_{tc} = 5.12 \text{ MPa}$$

ดังนั้นค่าความเค้นในแนวเส้นรอบวงภายในถังปฏิกรณ์ความดันสูง ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200 °C มีค่า 5.12 MPa

แนววิเคราะห์ (ค่าความเค้นในแนวแกน)

$$\sigma_{tL} = \frac{PD_i}{4t} = \frac{Pr_i}{2t}$$

แทนค่า

$$\sigma_{tL} = (2.35 \times 0.0381) / (2 \times 0.0175)$$

$$\sigma_{tL} = 2.56 \text{ MPa}$$

ดังนั้นค่าความเค้นในแนวแกนนอนภายในถึงปฏิกิริยาความดันสูง ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 200°C

มีค่า 2.56 MPa

ตารางที่ ซ-1 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในถึงปฏิกิริยาความดันสูง ณ อุณหภูมิต่างๆ

ลำดับ ที่	อุณหภูมิ เป้าหมาย ($^\circ\text{C}$)	ความดันเกจภายใน ถึงปฏิกิริยาความดันสูง		ค่าความเค้น (MPa)	
		kg/cm^2	MPa	ในแนวเส้นรอบวง	ในแนวแกนนอน
1	200	24	2.35	5.12	2.56
2	250	51	5.00	10.89	5.44
3	300	94	9.12	19.86	9.93

ภาคผนวก ณ.

การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved



ศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ศวท-มช.)
ชั้น 7 อาคาร 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 อ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่
โทรศัพท์ : 053-941971, 053-943397 โทรสาร : 053-892275 E.mail : stsc@science.cmu.ac.th
Science and Technology Service Center Faculty of Science Chiang Mai University (STSC-CMU) Thailand
7th Floor, 30th year Science Building, Faculty of Science, Chiang Mai University, 239 Huay-Kaew Road, Muang District
Chiang Mai, Thailand 50200 Tel: (6653) 941971, 943397 Fax: (6653) 892275 E.mail: stsc@science.cmu.ac.th

รายงานผลการทดสอบ

TR : 53/087

เลขที่รับงาน : STSC-CMU 53/032

หน่วยงานผู้ขอรับบริการ : โครงการการสาธิตการใช้แก๊สซีพีเออร์ผลิตเชื้อเพลิงแก๊สใช้ในด้าน ความร้อนสำหรับ

โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

ที่อยู่ : สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่

วันที่รับตัวอย่าง : 3 กุมภาพันธ์ 2553

วันที่เริ่มทำการวิเคราะห์ : 3 กุมภาพันธ์ 2553

วันที่เสร็จสิ้นการวิเคราะห์ : 19 กุมภาพันธ์ 2553

รายละเอียดตัวอย่าง : เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ สีดำนรรูในแก้วพลาสติก

ผลการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่าง :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	รายการที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์	หน่วยของผลการวิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
1	เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	ค่าความร้อน	5,490	แคลอรีต่อกรัม	Bomb calorimetry
		คาร์บอน	61.12	%	CHNS analyzer
		ไฮโดรเจน	8.39	%	
		ไนโตรเจน	1.11	%	
		ซัลเฟอร์	1.70	%	
		คาร์บอนคงตัว	4.13	%	AWWA standard for granular activated carbon
		สารระเหยได้	1.55	%	
		เถ้า	80.84	%	
		ความชื้น	13.48	%	
"End of report"					

หมายเหตุ :

"ผลการตรวจสอบ/วิเคราะห์ตามเอกสารข้างต้นนี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจวิเคราะห์เท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้เครื่องหมายเดียวกับตัวอย่างนี้ และห้ามใช้รายงานฉบับนี้ในการประกาศหรือข้อตกลง โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร"

ลงชื่อ.....

(ดร.สุวิทย์ เต็มเจริญกุล)

ผู้จัดการด้านวิชาการ

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. นวลศรี รักอริยะธรรม)

ผู้อำนวยการศวท-มช.



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 07428 6904-7 โทรสาร 07421 2813

F-RES-003 ฉบับที่ 7 บังคับใช้ 10/09/55

เลขที่ 2157/57 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม
ชั้น 8 อาคาร 30 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ. ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 2863/57

วันที่รับตัวอย่าง: 1 กรกฎาคม 2557

วันที่ขอใช้บริการฯ: 1 กรกฎาคม 2557

ผู้ทดสอบ: นางสาวทรงสุดา พรหมทอง

วันที่ทำการทดสอบ: 1-2 กรกฎาคม 2557

วิธีการทดสอบ: อ้างอิง WI-RES-CHNS-O-001

เครื่องมือทดสอบ: CHNS-O Analyzer, CE Instruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy

เทคนิคการทดสอบ: Dynamic Flash Combustion

สถานะการทดสอบ: สำหรับ CHNS

Left Furnace temperature : 900 °C Oven temperature : 65 °C

Carrier flow : 130 mL/min Reference flow : 100 mL/min

Oxygen flow : 250 mL/min

สำหรับ O

Right Furnace temperature: 1060 °C Oven temperature: 65 °C

Carrier flow: 130 mL/min Reference flow: 100 mL/min

รายละเอียดตัวอย่าง: น้ำมันชีวภาพ จำนวน: 3 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ชื่อตัวอย่าง	% ธาตุ				
		ไนโตรเจน	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	กำมะถัน	ออกซิเจน
1	CNSL	0.19	76.06	9.45	ไม่พบ	9.55
2	CNSL (WO)	0.31	78.22	9.79	ไม่พบ	9.80
3	CNSL (Na ₂ CO ₃)	0.31	78.36	9.84	ไม่พบ	9.86

ข้อมูลดิบถูกจัดเก็บในไฟล์เลขที่ 2863-57

ขีดจำกัดต่ำสุดของการทดสอบปริมาณเท่ากับ 0.01%



(นางรสนี กุลจิตร์)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

7 กรกฎาคม 2557

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน ยกเว้นถ้าทั้งฉบับ โดยไม่ได้ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 07428 6904-7 โทรสาร 07421 2813

F-RES-003 ฉบับที่ 7 บังคับใช้ 10/09/55

เลขที่ 2230 / 57 หน้า 1 / 1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม
ชั้น 8 อาคาร 30 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ. ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

เลขที่ใบขอรับบริการ: 2864 / 57

วันที่รับตัวอย่าง: 1 กรกฎาคม 2557

วันที่ขอรับบริการ: 1 กรกฎาคม 2557

ผู้ทดสอบ: นางสาวพัชรา ศุภรัตน์ และ นายทรงพล หอมอุทัย

วันที่ทำการทดสอบ: 10 กรกฎาคม 2557

วิธีการทดสอบ: อ้างอิง WI-RES-TGA-001 และ "Metal oxide correlation of dried biofuels leaves by thermogravimetry and elemental analysis" Kumar, J.V., and Pratt, B.C., American Laboratory, Feb, 2003

เครื่องมือทดสอบ: Thermogravimetric Analyzer, TGA7, Perkin Elmer, USA

เทคนิคการทดสอบ: Thermogravimetry

สภาวะการทดสอบ: ก๊าซ : ไนโตรเจน, ออกซิเจน

โปรแกรมทดสอบ: 1) Heat from 50.00 °C to 135.00 °C at 10.00 °C/min. ; Nitrogen
2) Hold for 5.0 min at 135.00 °C ; Nitrogen
3) Heat from 135.00 °C to 900.00 °C at 100.00 °C/min. ; Nitrogen
4) Hold for 20.0 min at 900.00 °C ; Oxygen

รายละเอียดตัวอย่าง: น้ำมันชีวภาพ จำนวน: 3 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ตัวอย่าง	%Weight			
		Moisture	Volatile matter	Fixed Carbon	Ash
1	CNSL	4.346	92.439	2.983	0.232
2	CNSL (WO)	0.955	91.358	7.400	0.287
3	CNSL (Na ₂ CO ₃)	1.968	93.819	4.071	0.142

* ผลการทดสอบเป็นข้อมูลสารแบบจำนวน 3 ซ้ำ

* ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ \\server2\\rawdata\\TGA\\57\\2864

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชากริต ทองใจ)

ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

17 กรกฎาคม 2557

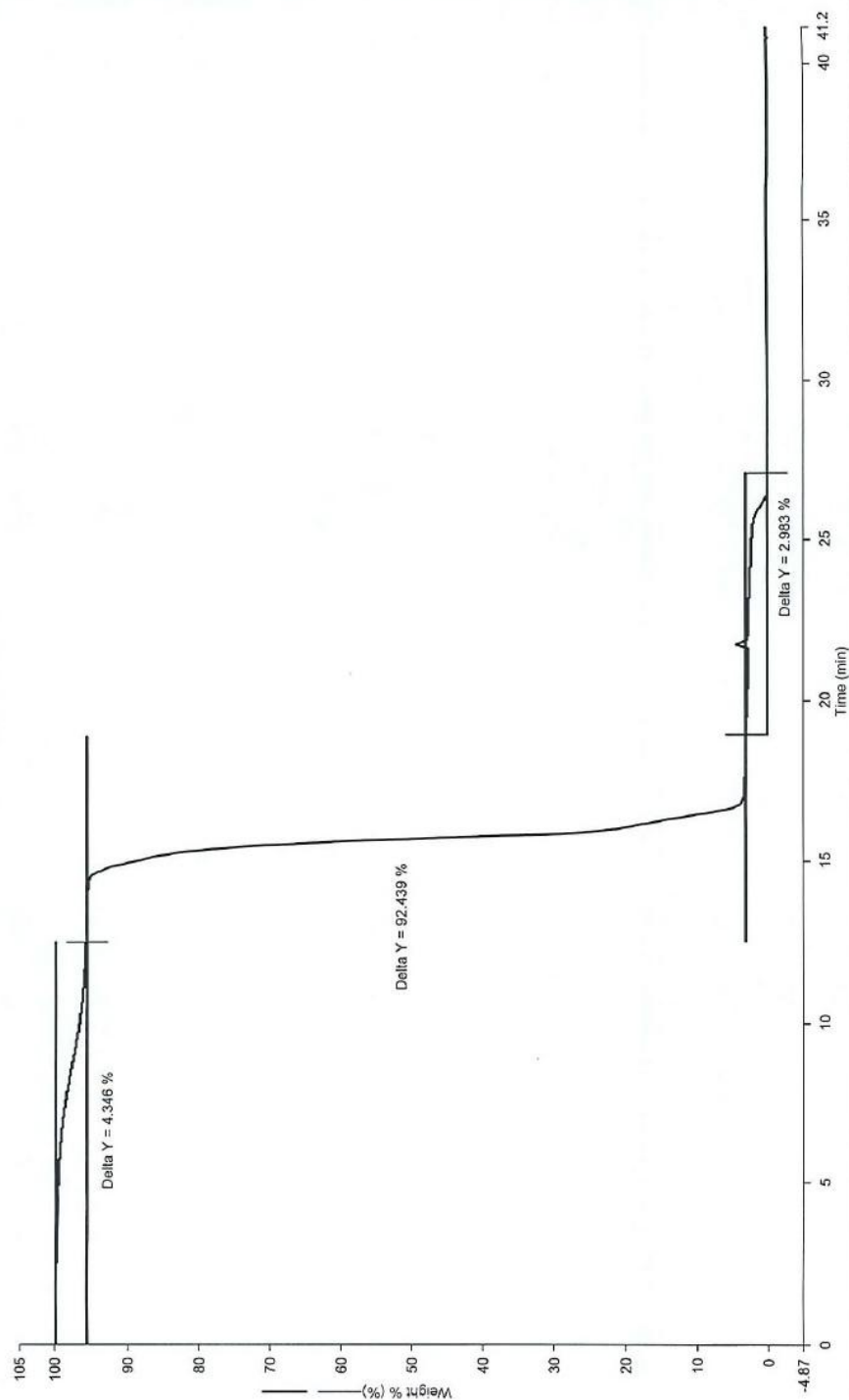


หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน
ยกเว้นที่ทางฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

Filename: c:\pep\p\p\p\data\286457@1.tnd - 10/7/2557 14:03:26
 Operator ID: CNSL
 Sample ID: CNSL
 Sample Weight: 23.189 mg
 Comment:

CNSL: 286457@1.tnd
 Unsubtracted Weight (%) : Steps: 1-4

Scientific Equipment Center, PSU



1) Heat from 50.007C to 135.007C at 10.007C/min
 2) Hold for 5.0 min at 135.007C

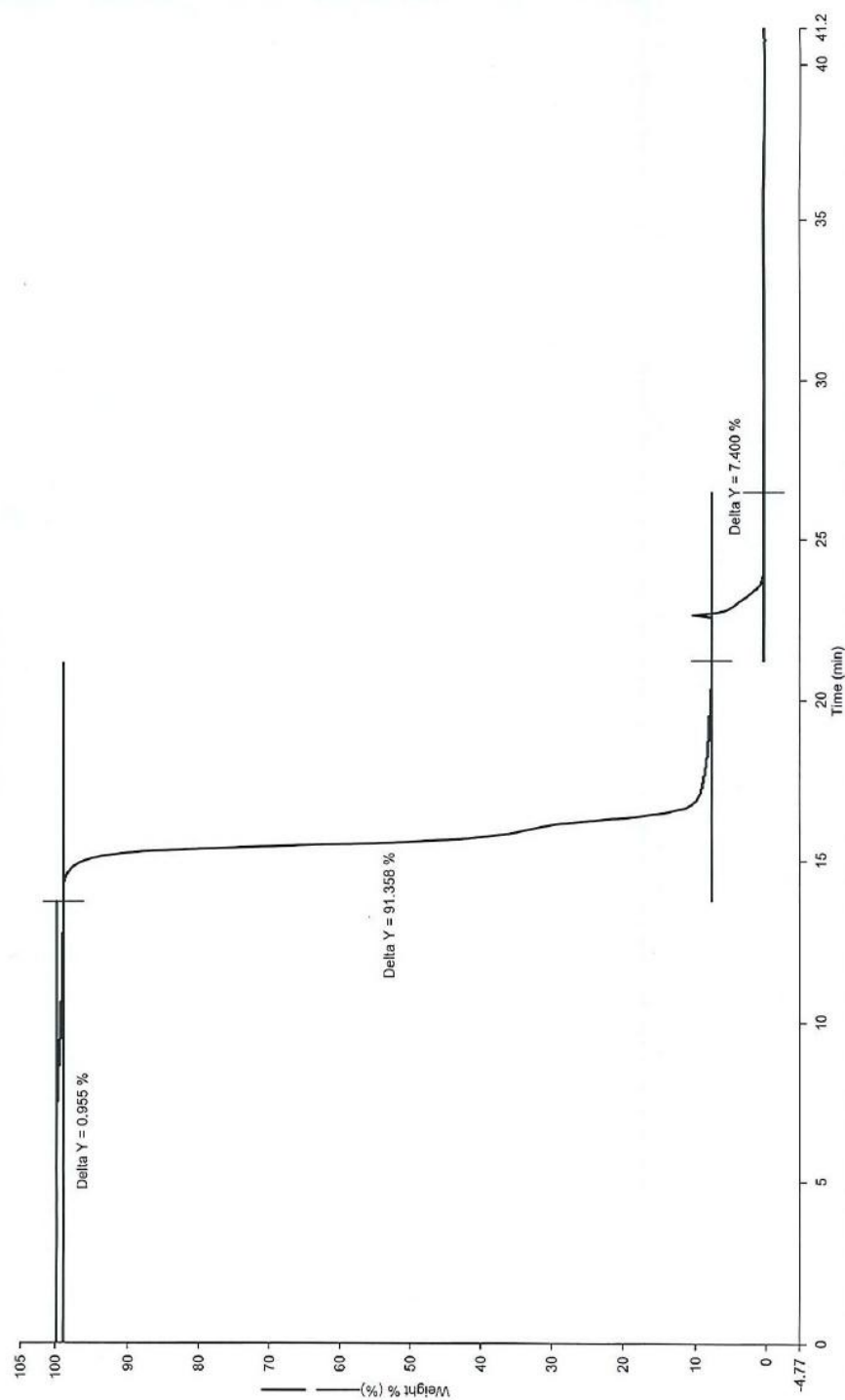
3) Heat from 135.007C to 900.007C at 100.007C/min
 4) Hold for 20.0 min at 900.007C

10/7/2557 15:48:39

Filename: c:\pe\pyris\data\2864\286457@2.tld - 10/7/2557 16:01:33
 Operator ID: CNSL (WO)
 Sample ID: CNSL (WO)
 Sample Weight: 23.794 mg
 Comment:

CNSL (WO): 286457@2.tld
 Unsubtracted Weight % (%) : Steps: 1-4

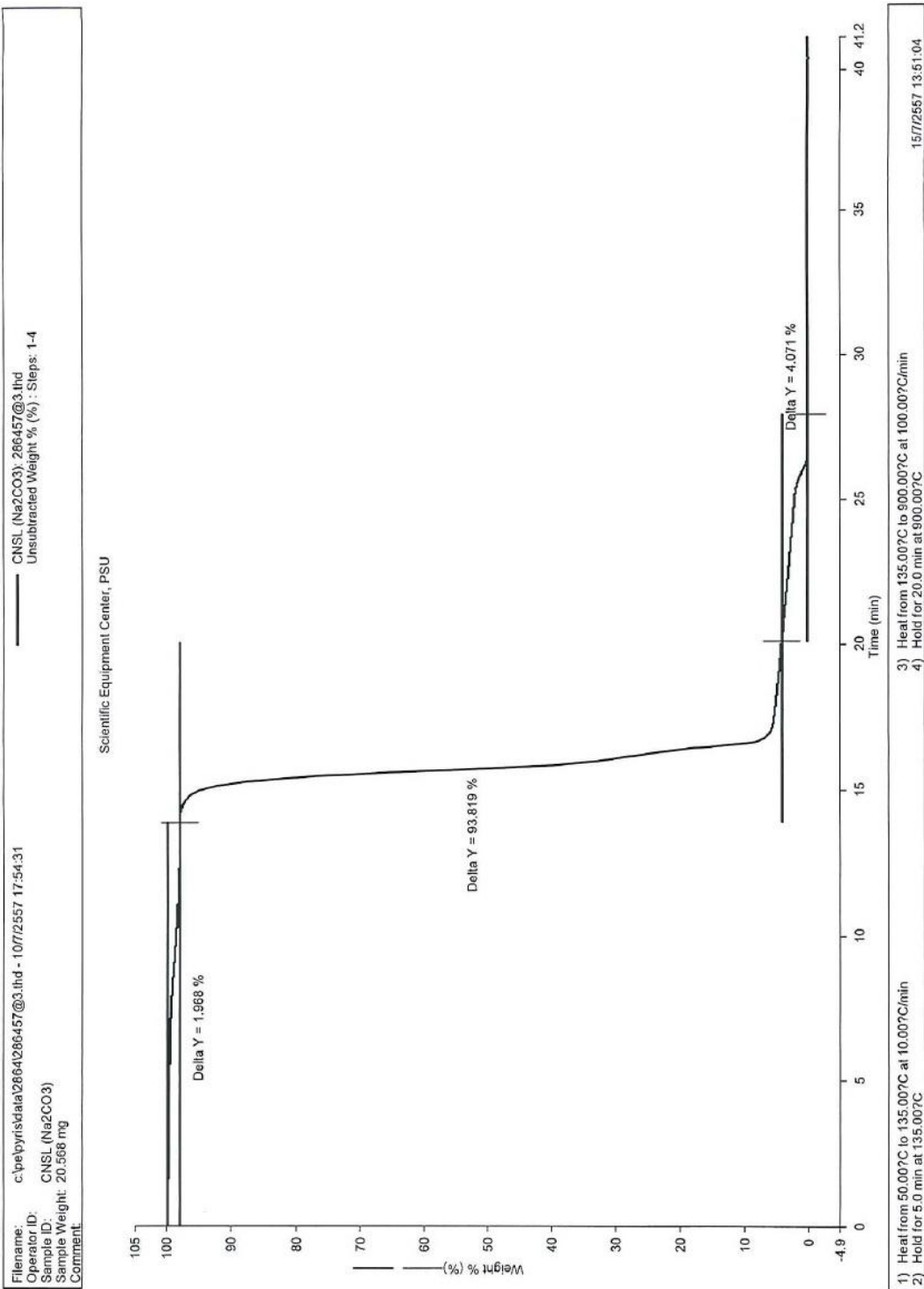
Scientific Equipment Center, PSU



1) Heat from 50.007C to 135.007C at 10.007C/min
 2) Hold for 5.0 min at 135.007C

3) Heat from 135.007C to 900.007C at 100.007C/min
 4) Hold for 20.0 min at 900.007C

15/7/2557 13:46:40





ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 07428 6904-7 โทรสาร 07421 2813

F-RES-003 ฉบับที่ 7 บังคับใช้ 10/09/55

เลขที่ 2205/57 หน้า 1/2

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า :	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม ชั้น 8 อาคาร 30 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ. ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200		
เลขที่ใบขอใช้บริการ :	2858/57		
วันที่รับตัวอย่าง :	1 กรกฎาคม 2557		
วันที่ขอใช้บริการ :	1 กรกฎาคม 2557		
ผู้ทดสอบ :	นางพิมพ์พิมพ์ พงษ์ภักฐานันต์		
วันที่ทำการทดสอบ :	9 กรกฎาคม 2557		
วิธีการทดสอบ :	อ้างอิง WI-RES-GC-ISQMS-001		
เครื่องมือทดสอบ :	Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, Trace GC Ultra / ISQ MS, Thermo Scientific Inc., USA		
เทคนิคการทดสอบ :	Gas Chromatography-Mass Spectrometry		
สภาวะการทดสอบ :	Gas Chromatograph	Mass Spectrometer	
Inlet temperature	: 280 °C, Splitless 50 ml/min @ time 0.5 min	Ionization mode	: Electron Ionization
Oven temperature	: Initial temperature 40 °C, hold for 3 min; Ramp to 300 °C at 5 °C /min, hold for 10 min	Acquisition mode	: Scan, 45-500 amu
Column	: TR-5MS, 30 m., film 0.25 µm, ID. 0.25 mm	Ion source temp.	: 250 °C
Constant Flow	: 1.0 ml/min	Transferline temp.	: 250 °C
รายละเอียดตัวอย่าง :	น้ำมันชีวภาพ	Solvent delay time	: 5.0 min
ผลการทดสอบ :		จำนวน:	3 ตัวอย่าง

ต่อหน้า 2

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ชกเว้นทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

โทรศัพท์ 07428 6904-7 โทรสาร 07421 2813

F-RES-003 ฉบับที่ 7 บังคับใช้ 10/09/55

เลขที่ 2205/57 หน้า 2/2

รายงานผลการทดสอบ

ที่	ชื่อตัวอย่าง	เวลารีเทนชัน (นาที)	สารประกอบ	สัดส่วน %
1.	CNSL	10.21	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	0.01
	ไฟล์ข้อมูล: 2858-57N1_02_140709222148	21.21	Dodecane	0.01
		26.64	Tetradecane	0.06
		31.49	Hexadecane	0.09
		35.84	OCTADECANE	0.06
		37.32	9-Hexadecen-1-ol	0.09
2.	CNSL (WO)	}	สารประกอบที่ตรวจพบมีค่า SI น้อยกว่า	
	ไฟล์ข้อมูล: 2858-57N1_03_140709233830		เกณฑ์การยอมรับซึ่งไม่สามารถระบุเป็น	
3.	CNSL (Na ₂ CO ₃)		สารประกอบได้	
	ไฟล์ข้อมูล: 2858-57N1_04_140710005504			

เกณฑ์ค่า SI ที่ยอมรับต้อง ≥ 900

อ้างอิงข้อมูลดิบที่ไฟล์เดอร์ 2858-57

หมายเหตุ รายละเอียดสารประกอบที่มีค่า SI < 900 แสดงในแผ่น CD

(นางรุสนี กุลศิริกร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

17 กรกฎาคม 2557

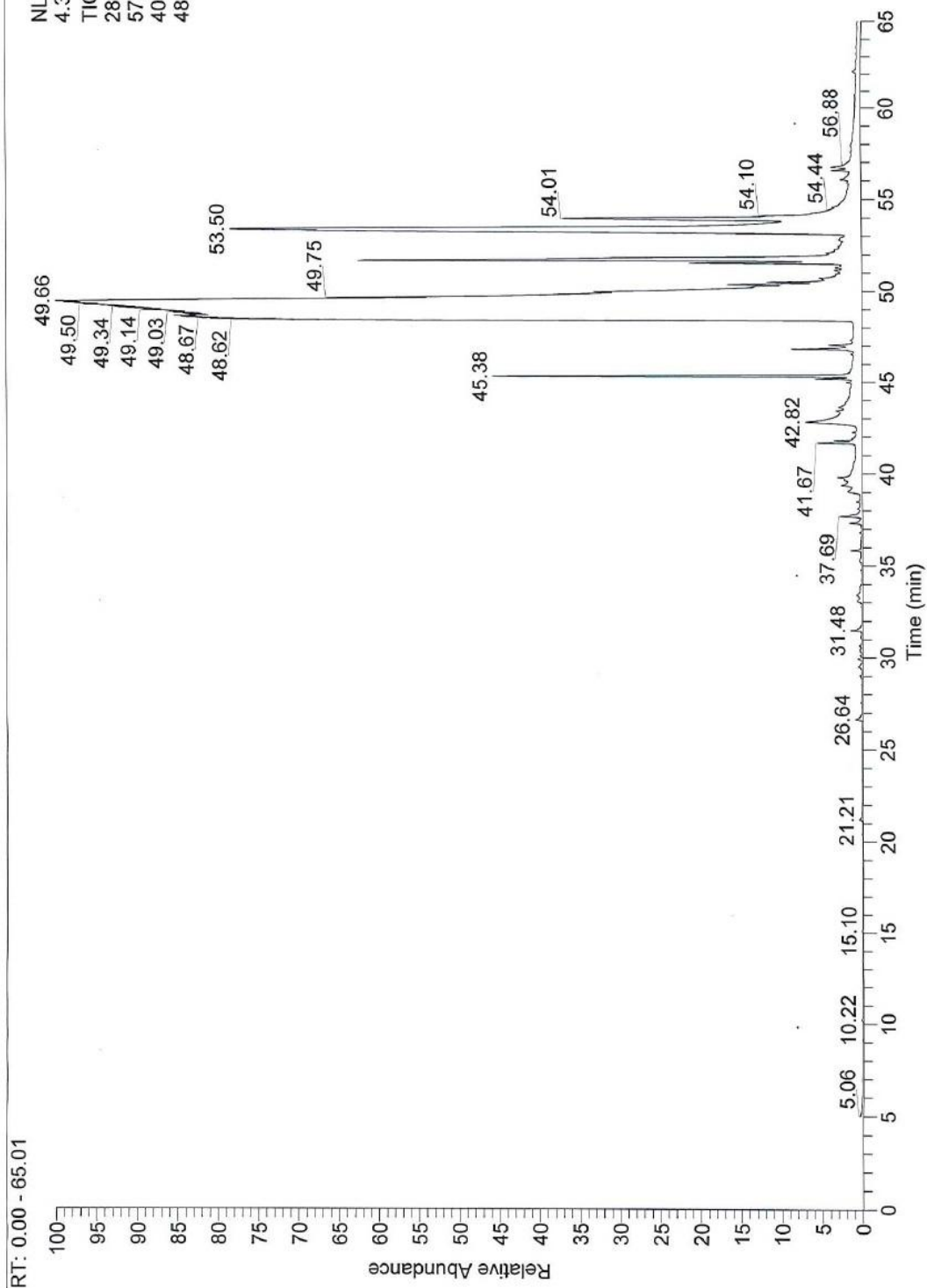
หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

2858-57N1_02_140709222148

7/9/2014 10:21:48 PM

CNSL

NL:
4.36E9
TIC MS
2858-
57N1_02_1
407092221
48



Peak Integration Report

Data File:	2858-57N1_02_140709	Original Data Path:	C:\Xcalibur\SEC-Res	Current Data Path:	C:\Xcalibur\SEC-Res
	222148		ults\2858-57		ults\2858-57
Sample Type:	Unknown	Sample ID:	Trayholder 1:Slot1:38	Sample Name:	CNSL
Operator:	Pimpimol	Acquisition Date:	07/09/14 10:21:48 PM	Run Time(min):	60.01
Comments:		Vial:	Trayholder 1:Slot1:38	Scans:	17647
Low Mass(m/z):	45.00000	High Mass(m/z):	499.96991	Sample Weight:	0.00
ISTD Amount:	0.000	Calibration Level:		Dilution Factor:	1.00

RT	Peak Area	Peak Height	Area %
10.21	61072967.19	7186031.87	0.01
15.10	34401964.60	3286344.57	0.01
21.21	152180849.82	14566476.75	0.03
21.54	53979469.59	4675781.85	0.01
26.64	268789912.28	35314624.76	0.06
26.86	63454862.43	8985614.61	0.01
28.56	33588215.77	4275125.84	0.01
28.69	41497705.04	4163770.78	0.01
29.02	54968547.20	8726917.13	0.01
29.50	169759208.72	17747964.59	0.04
29.94	109832110.48	19616584.43	0.02
30.12	40127320.95	7247597.42	0.01
30.36	46172868.08	8424419.64	0.01
30.46	47962759.90	9225393.89	0.01
30.65	56603081.10	11382927.42	0.01
31.12	56242150.29	3720087.57	0.01
31.49	420629548.49	56437333.82	0.09
33.07	282265749.41	22642031.16	0.06
33.41	367194096.98	26985544.44	0.08
33.71	40929237.07	6511758.09	0.01
33.87	85553640.62	8692012.00	0.02
35.27	103885712.56	7847853.40	0.02
35.85	258554646.13	53827357.61	0.06
37.32	401937402.33	61088575.50	0.09
37.69	904055557.42	109524399.37	0.20
38.11	129771539.31	16755316.49	0.03
38.50	102516421.01	21811490.22	0.02
39.05	966389870.69	62467869.95	0.21
39.38	1331414222.55	94208064.63	0.29
39.66	610024260.40	78071876.84	0.13
39.80	1687330808.28	106898182.44	0.37
40.42	171279079.39	19280441.67	0.04
40.57	142324273.74	13131283.29	0.03
41.67	1052673929.37	194844200.33	0.23
41.81	460666271.94	111458443.10	0.10
41.91	149483538.77	20928548.45	0.03
42.25	91040988.57	19412237.60	0.02
42.82	5597793185.94	265927006.17	1.24
43.43	1011109196.29	96580892.61	0.22
43.62	1165901447.49	82718983.53	0.26
43.89	823954524.99	45759512.58	0.18
44.32	153037555.62	15742137.91	0.03
44.53	89737481.85	13332641.02	0.02
44.64	97395250.80	11809931.99	0.02
44.98	116046666.47	25422772.16	0.03
45.19	765235494.99	184410073.19	0.17
45.38	9467986343.77	1845365843.82	2.09
45.68	118249075.58	12874146.10	0.03
45.92	35689984.56	5731910.16	0.01
46.56	50590445.60	12503733.51	0.01
46.85	1629922393.61	309050161.18	0.36
47.05	828158488.71	127088662.27	0.18
47.31	122821592.73	16093811.16	0.03
48.73	61979507304.09	3490222638.60	13.71
48.82	15601099535.68	3495143123.95	3.45
48.89	13379890686.88	3463269471.76	2.96
48.93	10577632516.78	3465157491.52	2.34
49.03	18532450370.62	3523195759.47	4.10
49.14	22520298587.20	3620618456.30	4.98
49.65	127738490302.52	3991275392.28	28.26

There is no signature data to report.

Peak Integration Report

RT	Peak Area	Peak Height	Area %
49.75	21392380007.39	2404811435.32	4.73
50.01	10380156753.44	1018558424.82	2.30
50.39	1082286017.43	313172248.74	0.24
50.52	716490495.67	226982225.18	0.16
50.73	270412563.92	51956608.03	0.06
50.94	45255606.06	12164352.78	0.01
51.05	45764095.96	12799086.00	0.01
51.17	115401211.30	29835654.27	0.03
51.30	123935525.89	31033144.84	0.03
51.57	3916322950.73	775591737.81	0.87
51.78	24282832237.75	2565772730.27	5.37
52.11	649797498.01	86750607.41	0.14
52.27	367798831.28	45720752.13	0.08
52.44	207423472.07	26788124.70	0.05
52.66	79462894.35	11301042.07	0.02
52.81	163258215.86	24851073.10	0.04
52.90	113164996.53	20359141.70	0.03
53.50	61681764089.54	3285472313.02	13.64
54.01	19603337295.61	1493036077.11	4.34
54.58	649522457.34	61066003.23	0.14
55.90	56683485.63	10515436.08	0.01
56.07	511304990.64	46834534.48	0.11
56.58	503561391.27	96119232.01	0.11
56.74	1119285235.35	102786718.20	0.25
57.57	33955174.99	6701105.18	0.01
57.95	124009041.76	8449426.36	0.03
60.73	39237216.19	3722596.31	0.01
62.14	219632293.03	18493828.40	0.05
62.74	37218588.89	3781568.76	0.01
63.53	74294366.03	4987741.23	0.02

There is no signature data to report.

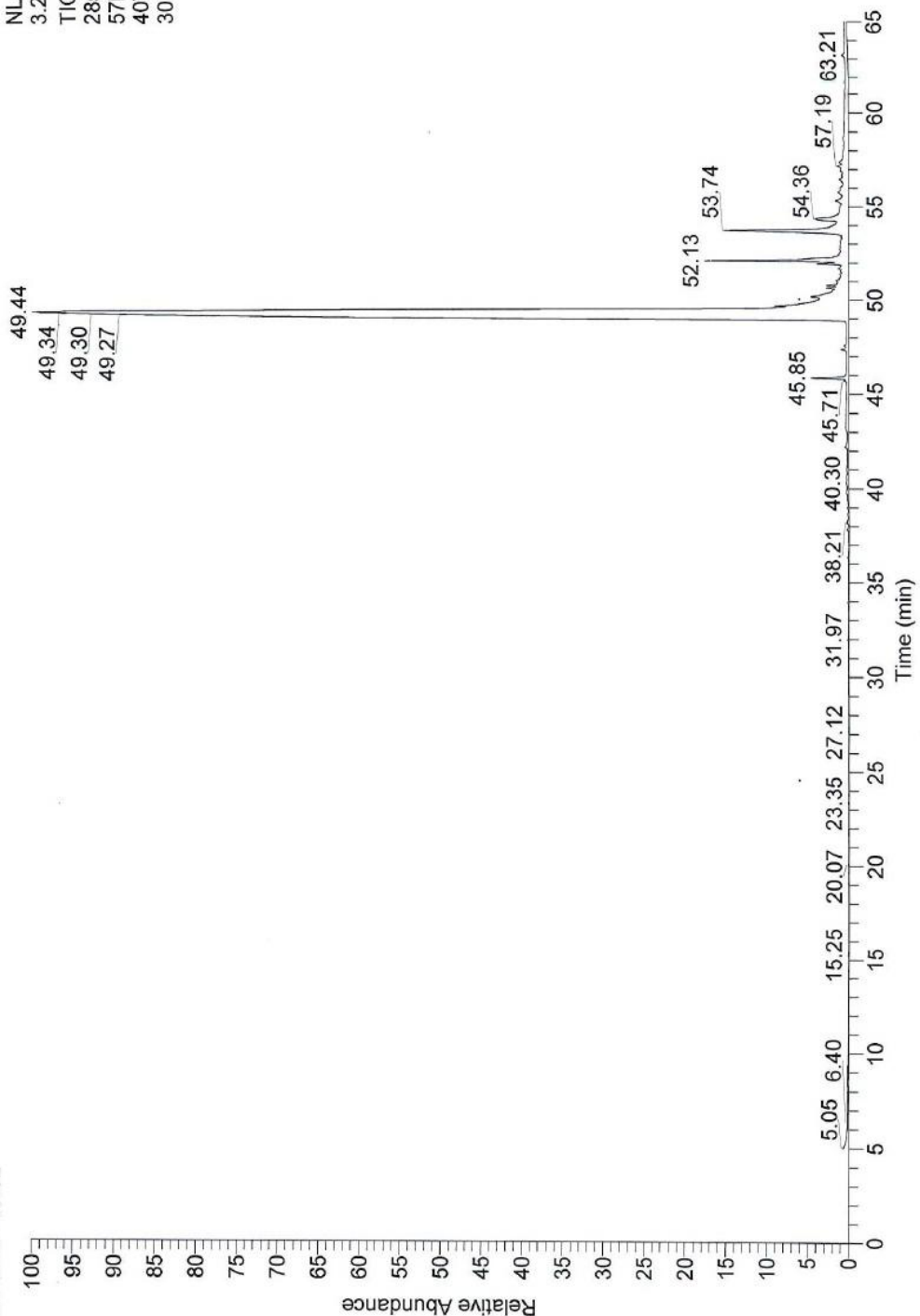
2858-57N1_03_140709233830

7/9/2014 11:38:30 PM

CNSL(WO)

RT: 0.00 - 65.02

NL:
3.25E9
TIC MS
2858-
57N1_03_1
407092338
30



Peak Integration Report

Data File: 2858-57N1_03_140709 Original Data Path: C:\Xcalibur\SEC-Res Current Data Path: C:\Xcalibur\SEC-Res
 233830 ults\2858-57
 Sample Type: Unknown Sample ID: Trayholder 1:Slot1:39 Sample Name: CNSL(WO)
 Operator: Pimpimol Acquisition Date: 07/09/14 11:38:30 PM Run Time(min): 60.02
 Comments: Vial: Trayholder 1:Slot1:39 Scans: 17650
 Low Mass(m/z): 45.00000 High Mass(m/z): 499.96985 Sample Weight: 0.00
 ISTD Amount: 0.000 Calibration Level: Dilution Factor: 1.00

RT	Peak Area	Peak Height	Area %
45.85	727758780.33	137897304.90	0.77
49.44	82547860683.10	3116604152.08	87.18
49.70	929315237.22	148150743.96	0.98
50.19	439029159.82	49228749.00	0.46
50.81	169245319.87	38523010.61	0.18
51.96	472800786.11	97318725.30	0.50
52.13	3468750626.22	531122097.26	3.66
53.74	4589679000.43	456091229.31	4.85
54.36	1136997885.59	96691120.95	1.20
55.34	204426716.29	24531811.39	0.22

There is no signature data to report.

Peak Integration Report

Data File: 2858-57N1_04_140710 Original Data Path: C:\Xcalibur\SEC-Res Current Data Path: C:\Xcalibur\SEC-Res
005504 ults\2858-57
Sample Type: Unknown Sample ID: Trayholder 1:Slot1:40 Sample Name: CNSL(Na2CO3)
Operator: Pimpimol Acquisition Date: 07/10/14 12:55:04 AM Run Time(min): 60.02
Comments: Vial: Trayholder 1:Slot1:40 Scans: 17649
Low Mass(m/z): 45.00000 High Mass(m/z): 499.96985 Sample Weight: 0.00
ISTD Amount: 0.000 Calibration Level: Dilution Factor: 1.00

RT	Peak Area	Peak Height	Area %
46.74	733805207.68	127762579.63	0.83
50.31	76728572168.18	2895324625.81	87.20
50.59	1268614369.53	153182154.48	1.44
51.08	536190772.84	55495514.21	0.61
52.86	398445461.83	75517915.99	0.45
53.03	2952805323.09	427232006.07	3.36
54.65	4199916706.25	395129978.13	4.77
55.22	393323705.46	75593954.33	0.45
55.28	606319270.82	79941505.68	0.69
56.33	173037427.14	18370458.25	0.20

There is no signature data to report.

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผู้รับบริการ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม

วันที่ส่งตัวอย่าง 6 สิงหาคม 2557

ผลการวิเคราะห์ก๊าซ

จุดเก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์					
	ก๊าซไฮโดรเจน, % โมล	ก๊าซออกซิเจน, % โมล	ก๊าซไนโตรเจน, % โมล	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, % โมล	ก๊าซมีเทน, % โมล	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, % โมล
1. Water	0	4.7	31	0.11	0	2.3
2. Water + Na ₂ CO ₃	0	2.4	33	0.15	0	4.0

หมายเหตุ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ขอยืนยันผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซที่ได้มีการเก็บและนำส่งให้ภาควิชาฯ ว่ามีคุณสมบัติดังแสดงในตารางข้างต้น ทั้งนี้ภาควิชาฯ ไม่มีส่วนในการเก็บและนำส่งตัวอย่างก๊าซแต่อย่างใด

ตรวจสอบโดย



วันที่ 26 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2557

ผู้รับบริการ.....ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม
ประเภทตัวอย่าง.....ตัวอย่างก๊าซ จาก water + Na₂CO₃
วันที่ส่งตัวอย่าง..... 6 สิงหาคม 2557.....

ประเภทก๊าซ	Area Std.	Area Std.(mean)	% RPD	% mole Std.	factor	Area Sample	Area Sample (mean)	% RPD	% mole sample
1. Hydrogen, H ₂	187	188.50	1.59	4.0	0.021220159	0	0.00	0.00	0
	190					0			
2. Oxygen, O ₂	14,367	14,316.50	-0.71	5.0	0.000349247	7,319	6,977.50	-9.79	2.4
	14,266					6,636			
3. Nitrogen, N ₂	26,409	26,287.50	-0.92	5.0	0.000190204	175,777	174,382.50	-1.60	33
	26,166					172,988			
2. Carbonmon , CO	12,914	12,900.50	-0.21	5.0	0.000387582	392	385.50	-3.37	0.15
	12,887					379			
3. Methane, CH ₄	8,348	8,375.50	0.66	4.0	0.000477583	0	0.00	0.00	0
	8,403					0			
4. Carbondioxide, CO ₂	7,730	7,943.50	5.38	5.0	0.000629445	6,369	6,299.50	-2.21	4.0
	8,157					6,230			
		70,012.00		28			188,045.00		39.7



ห้องปฏิบัติการกลาง อาคารเฉลิมพระเกียรติ ชั้น ๒ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ๒๓๙ ถ. ห้วยแก้ว ต. สเทพ
อ.เมืองเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ ๕๐๒๐๐ โทร. ๐-๕๓๙๔-๔๐๘๘, ๐-๕๓๙๔-๔๐๙๑ ต่อ ๑๗, ๒๐, ๒๑ โทรสาร ๐-๕๓๒๐-๕๑๙๔
Central Laboratory, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. 239 Huay Keaw Road, Suthep, Muang, Chiang
Mai 50200, Thailand. Tel: +66-5394-4088, +66-5394-4091 Ext. 17, 20, 22 : Fax: +66-5321-5175

No. 5705/10

ใบรายงานผลการวิเคราะห์

วันรับตัวอย่าง : 28 พฤษภาคม 2557 วันรายงานผล : 23 มิถุนายน 2557
ชนิดตัวอย่าง : น้ำเสีย 2 ตัวอย่าง
ผู้ส่งตัวอย่าง : ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม
ที่อยู่ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผลการวิเคราะห์

ลำดับที่	รายการวิเคราะห์	A5705039 Water	A5705040 Water+Na ₂ CO ₃
1	pH	3.38	7.06
2	Electrical Conductivity (mS/cm)	1.54	7.15
3	Total Nitrogen (%)	0.02	0.01
4	Phosphorus (mg/L)	31.67	15.00
5	Potassium (mg/L)	318.26	171.99
6	Sodium (mg/L)	37.29	1,008.29
7	Calcium (mg/L)	14.90	12.15
8	Magnesium (mg/L)	34.22	14.14
9	Sulfur (mg/L)	29.04	19.39
10	Iron (mg/L)	<0.5	0.34
11	Manganese (mg/L)	1.98	0.90
12	Copper (mg/L)	0.79	0.94
13	Zinc (mg/L)	0.47	0.32
14	Boron (mg/L)	0.28	0.48

ผลการวิเคราะห์นี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำผลการวิเคราะห์ประกอบการโฆษณาใดๆ



ผู้วิเคราะห์



ผู้ตรวจสอบ

หมายเหตุ : ตัวอย่างที่ส่งวิเคราะห์จะเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 1 เดือน หากมีปัญหาโปรดติดต่อกลับภายใน 1 เดือนนับตั้งแต่วันได้รับผล

ภาคผนวก ญ.

รายละเอียดคุณสมบัติของถังปฏิกรณ์แรงดันสูง



High Pressure Equipment



Bolted Closure Reactors

The Bolted Closure Reactors are designed for use up to 650°F (343°C) at the working pressures indicated. Standard material for the body, cover and gasket is Type 316 stainless steel. Standard O-rings may be used in place of the metal gasket when temperatures permit.

Standard connections include two high pressure (coned and threaded) tubing connections for 1/4" O.D. tubing (HF4) located in the cover. Contact factory if other connections and/or locations are preferred.

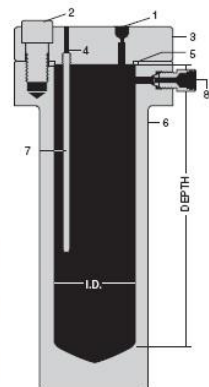
Other items available include:

- Heating mantle. Removable quartz fabric cylinder column type, 110 volt, single phase. Bolted closure reactors are supplied with mounting bolt holes on the bottom surface.
- Thermowell for use with 1/16" thermocouple
- Safety head located in side flange with rupture disc (see Page 3.7)

Bolted Closure Reactors

Catalog No.	Capacity	Working Pressure psi	Temperature Rating °F	Inside Diameter	Inside Depth	Approx. Weight (pounds)	Approx. Torque (ft-lb) per Bolt	Material
BC-1	300 mL	5,000	650	2"	6"	21	45	316 S.S.
BC-2	1 liter	5,000	650	3"	9"	50	125	316 S.S.
BC-3	2 liter	5,000	650	3 1/2"	12 1/2"	68	185	316 S.S.
BC-4	1 gallon	3,000	650	5"	12"	97	220	316 S.S.
BC-5	1 gallon	5,000	650	5"	12"	152	280	316 S.S.
BC-6	2 gallon	3,000	650	6 1/2"	14"	245	280	316 S.S.

1. PRESSURE CONNECTION (2)
 2. SOCKET CAP SCREW
 3. COVER
 4. GASKET
 5. MAIN SEAL
 6. BODY
 7. THERMOCOUPLE WELL*
 8. SAFETY HEAD*
- * SUPPLIED AS EXTRA WHEN SPECIFIED



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย นิตยธินันท์ บริรักษ์

วัน เดือน ปี เกิด ธันวาคม พ.ศ. 2526

ประวัติการศึกษา ปีการศึกษา 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประสบการณ์ พ.ศ. 2554 – 2558 วิศวกรอาวุโส : ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2549 – 2554 วิศวกร : ฝ่ายบริการวิชาการ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน
นครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

