การพัฒนาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน

วิทยานิพนธ์

ของ

สมเจตน์ ไชยลาภ

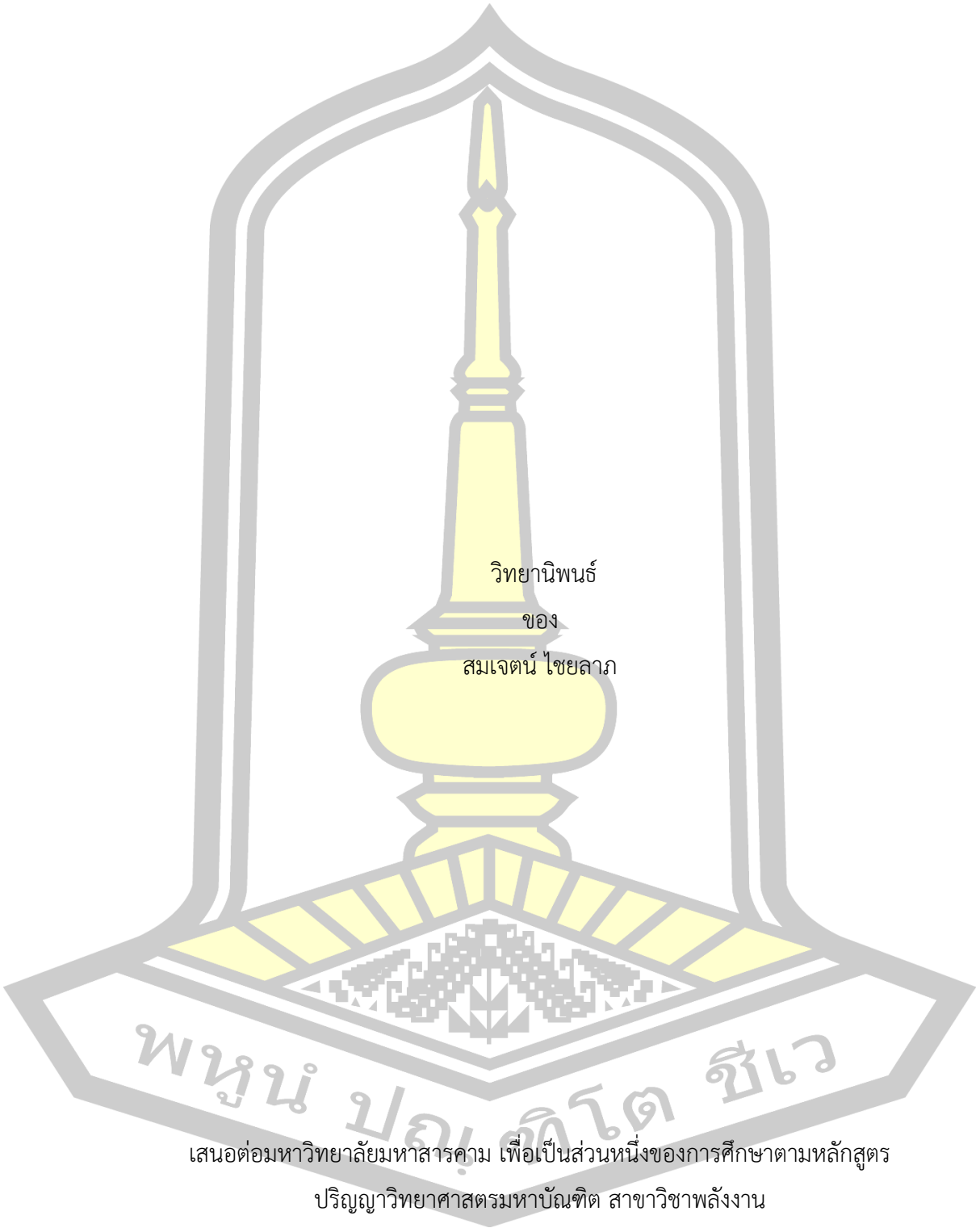
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงาน

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน



วิทยานิพนธ์

ของ

สมเจตน์ ไชยลาภ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงาน

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Biomass Gasifier Stove Coupled with Bio-Char Production for Household

Somchet Chaiyalap

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for Master of Science (Energy)

June 2024

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสมเจตน์ ไชยลาภ แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงาน ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รศ. ดร. ไพศาล จี้ฟู)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผศ. ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผศ. ดร. เจนจิรา เปี่ยมดี)

.....กรรมการ
(รศ. ดร. ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รศ. ดร. ไพศาล จี้ฟู)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงาน ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

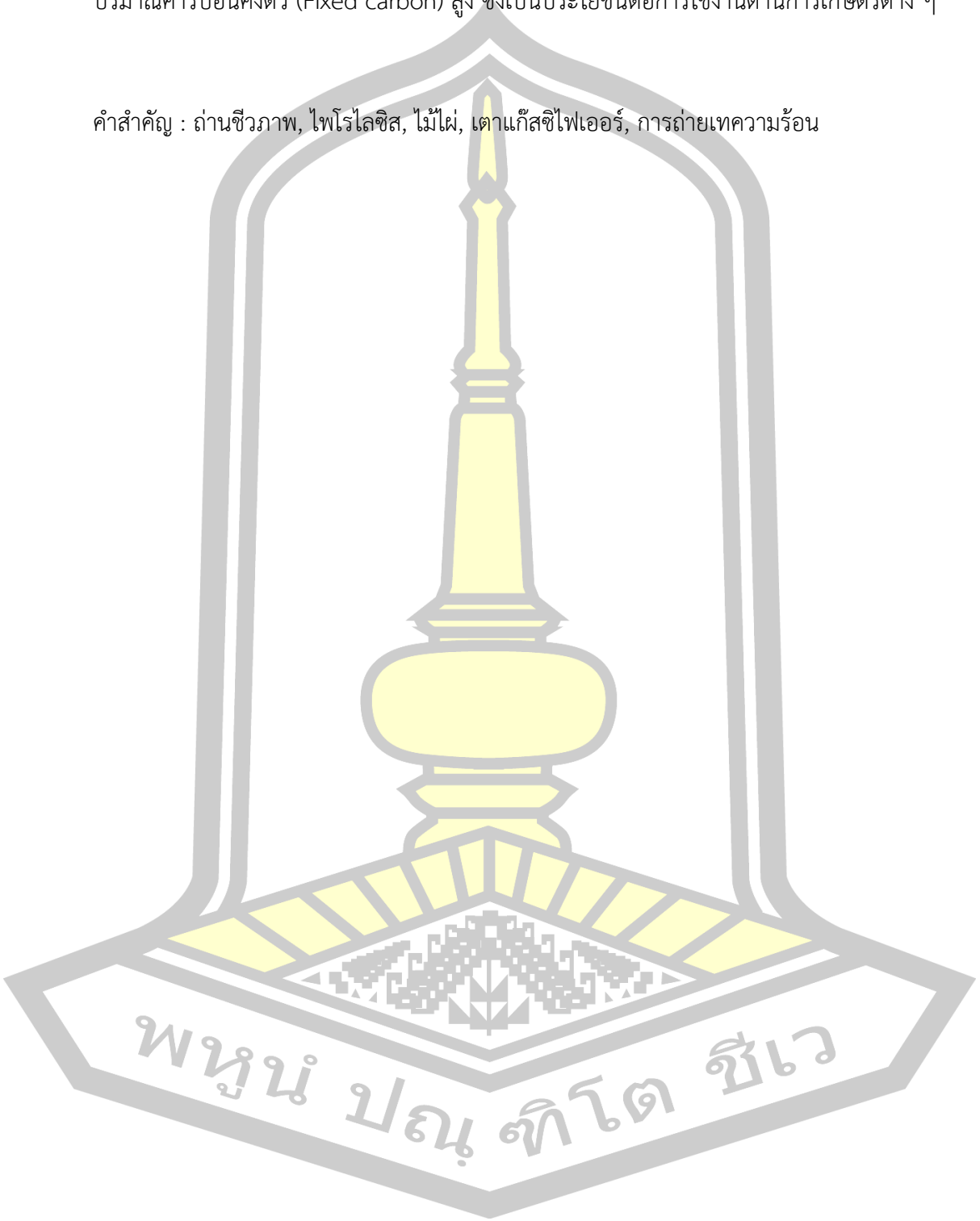
ชื่อเรื่อง การพัฒนาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน
ผู้วิจัย สมเจตน์ ไชยลาภ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจนจิรา เปี่ยมดี
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** พลังงาน
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2567

บทคัดย่อ

ความต้องการถ่านชีวภาพ (Biochar) ทั่วโลก ในการใช้งานทางการเกษตรและการกักเก็บคาร์บอนกำลังเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้เตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ในครัวเรือนขนาด 50 ลิตร (50L-HBGS) ในประเทศไทยพบปัญหาสำคัญที่ต้องปรับปรุง งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลของแกนเตาแบบรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (NCCS) ต่อลักษณะการผลิตถ่านชีวภาพของเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ในครัวเรือนขนาด 50 ลิตร ซึ่งเดิมมีประเด็นปัญหาสำคัญได้แก่ การเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่อง ชิ้นไม้ที่เหลืออยู่ในเตาด้านล่างกลายเป็นถ่านชีวภาพไม่หมดเมื่อสิ้นสุดการเผาไหม้ และปัญหาการปนเปื้อนน้ำมันดินเหลวในผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ โดยแกนเตาทำจากวัสดุเหล็ก ได้รับการออกแบบและศึกษาที่มหาวิทยาลัยมหาสารคามเพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น ความสูงแกนเตา ช่องลมเข้า และเส้นผ่านศูนย์กลางช่องลมออกของแกนเตาแบบ NCCS ได้รับการออกแบบให้มีขนาด 45, 20 และ 11.4 เซนติเมตร ตามลำดับ เจาะช่องจ่ายแก๊สไพโรไลซิส 21 รู ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร โดยเจาะที่ส่วนโค้งเกือบถึงด้านล่างของแกนเตาแบบ NCCS หลังจากที่แกนเตาแบบ NCCS ประกอบเข้ากับเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ในครัวเรือนขนาด 50 ลิตรแล้ว ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับแกนเผาไหม้แบบเดิม โดยใช้ท่อนไม้ไผ่เลี้ยงแห้งน้ำหนัก 9 กิโลกรัม ในการทดลองแต่ละครั้ง มีการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้โดยใช้ภาวะอุณหภูมิของเตาซึ่งบันทึกทุก ๆ 5 นาที โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลดิจิทัล ศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) เครื่องสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (FTIR) และเทคนิคการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การศึกษาแสดงให้เห็นว่าเตาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ 50 ลิตร ที่มีแกนเตาแบบ NCCS สามารถเผาไหม้ต่อเนื่องได้ดีกว่าเตาที่มีแกนเตาแบบเดิม นอกจากนี้ยังให้อุณหภูมิระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสที่สูงกว่า 500 $^{\circ}$C ส่งผลให้น้ำมันดินเหลวถูกกำจัดออกไป และไม่มีเศษไม้ที่ยังไม่เป็นถ่านในตอนล่างภายในเตา ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่าเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ขนาด 50 ลิตร ที่มี

แกนเตาแบบ NCCS สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดรูพรุนระดับมาโครสปอร์ในสัดส่วนที่สูงและมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานด้านการเกษตรต่าง ๆ

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพ, ไพโรไลซิส, ไม้ไผ่, เตาแก๊สซิไฟเออร์, การถ่ายเทความร้อน



TITLE Development of Biomass Gasifier Stove Coupled with Bio-Char Production for Household

AUTHOR Somchet Chaiyalap

ADVISORS Assistant Professor Arnusorn Saengprajak , Ph.D.
Assistant Professor Jenjira Piamdee , Ph.D.

DEGREE Master of Science **MAJOR** Energy

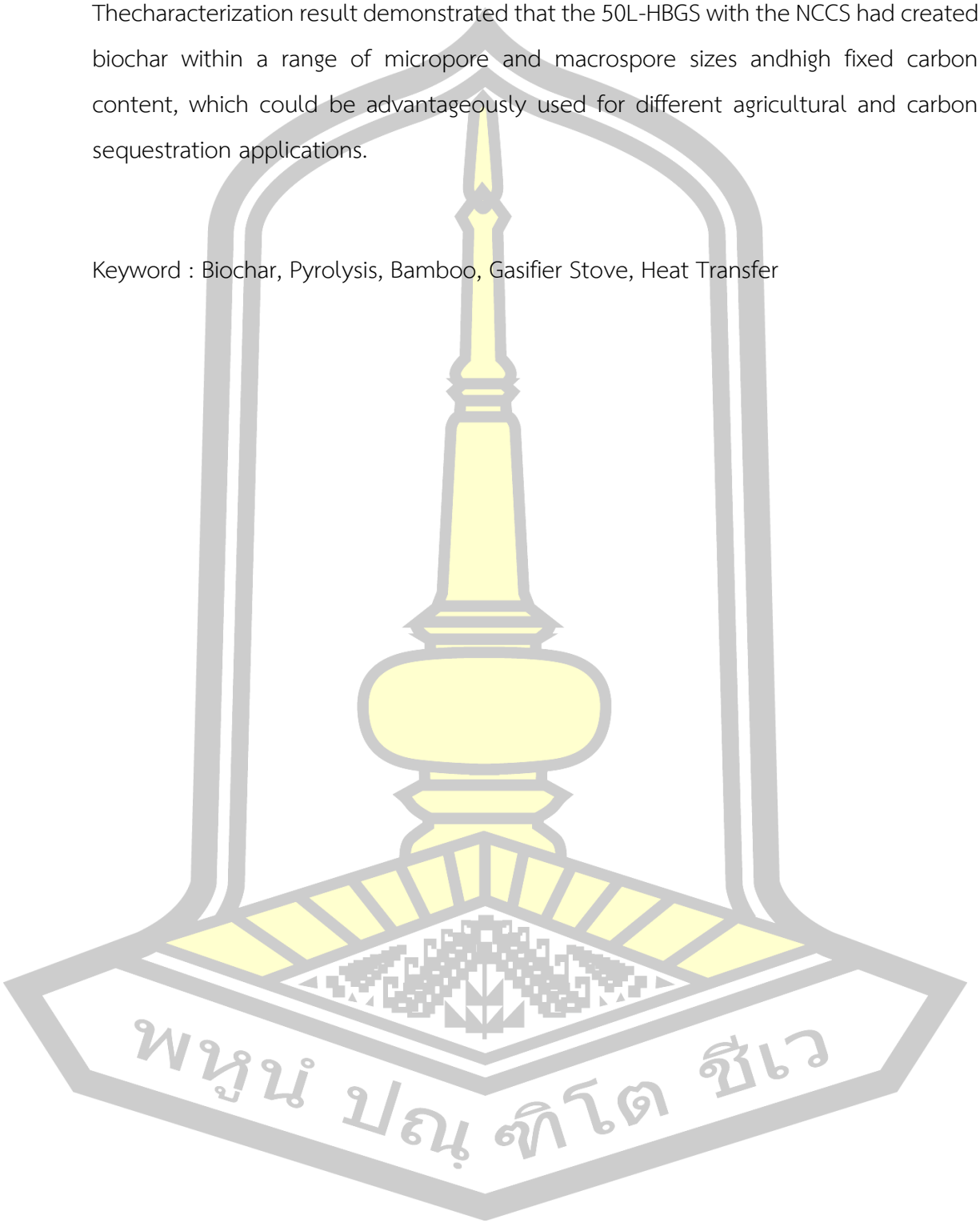
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2024

ABSTRACT

The global demand for biochar in agricultural and carbon sequestration applications is increasing; nevertheless, biochar production using the 50-liter household biomass gasifier stove (50L-HBGS) in Thailand found major issues that need to be improved. The objective of this study was to study the effects of the airflow in the non-uniform combustion core shape (NCCS) on the biochar production characteristic of the 50L-HBGS. The new design of the NCCS was constructed and studied to replace the existing combustion core shape (ECCS) at Mahasarakham University. The height, air inlet, and air outlet diameters of the NCCS were designed at 45, 24, and 11.4 cm, respectively. The NCCS with 21 holes of the pyrolysis gas outlet, a diameter of 4 mm for each, was integrated into the 50L-HBGS and performed comparative tests to the ECCS using 9 kg of bamboo wood chunks in three consecutive experiments. The airflow and the combustion behavior were studied through the stove temperature profiles, which were recorded every 5 minutes using a digital data logger. The biochar products were studied using the scanning electron microscope (SEM) with the energydispersive x-ray spectroscopy (EDS), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and the proximate analysis technique. The study indicated that the 50L-HBGS with the NCCS made significantly improved the airflow rates in the combustion core, resulting in better continuous burning during the ignition state than with the ECCS. Moreover, the pyrolysis temperatures were significantly improved, it was provided temperatures during thepyrolysis process reached higher than 500 ^{o}C, resulting in the

liquid tar being removed and no unburned wood chunks remaining at the end. Thecharacterization result demonstrated that the 50L-HBGS with the NCCS had created biochar within a range of micropore and macrospore sizes andhigh fixed carbon content, which could be advantageously used for different agricultural and carbon sequestration applications.

Keyword : Biochar, Pyrolysis, Bamboo, Gasifier Stove, Heat Transfer



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานวิจัยจนกระทั่งเสร็จสิ้นงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกขอบคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของอาจารย์ที่ได้ให้ความรู้และแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล จี้ฟู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาทำหน้าที่เป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งได้ให้ความรู้และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจนจิรา เปี่ยมดี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริยาภรณ์ แสงอรุณ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กันยาพร ไชยวงศ์ คณะวิศกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือในการศึกษาวิจัยเพื่อการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อที่เป็นแรงบันดาลใจให้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท กราบขอบพระคุณคุณแม่และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจเสมอมา และขอบพระคุณเครือข่ายพลังงานยั่งยืนที่ทั้งให้กำลังใจ ความรู้ และเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยมีความพยายามในการทำวิทยานิพนธ์ที่เป็นประโยชน์ต่อเครือข่ายพลังงานยั่งยืน ผู้วิจัยจึงขอมอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไว้เพื่อเป็นเกียรติแด่บิดามารดา ครอบครัว อาจารย์ที่ปรึกษา เครือข่ายพลังงานยั่งยืน และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สมเจตน์ ไชยลาภ

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 4

1.3 ขอบเขตการวิจัย 4

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 5

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ 5

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 เตาหุงต้มชีวมวล (Biomass Cooking Stove) 6

2.1.1 ชนิดของเตาหุงต้ม 7

2.2 เตาก๊าซซิไฟเออร์ (Gasifier) 9

2.2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) 9

2.3 เทคโนโลยีการเผาไหม้ชีวมวล 14

2.3.1 การเผาไหม้โดยตรง 15

2.3.2 การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical conversion) 16

2.3.3 การใช้ประโยชน์พลังงานจากชีวมวล 19

2.4 หลักการออกแบบเตาหุงต้มที่ใช้ฟืน 21
2.5 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) 23
2.5.1 การเผาไหม้ 24
2.5.2 ไพโรลีซีสของไม้ 25
2.5.3 การเผาไหม้สารระเหย 26
2.5.4 การเผาไหม้ถ่าน 26
2.5.5 การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ 27
2.5.6 การปลดปล่อยจากอนุภาคเขม่า (Emission of the soot particles) 27
2.5.7 การปลดปล่อยแก๊ส (Emission of the gases) 27
2.6 ถ่านชีวภาพ 28
2.6.1 ถ่านไม้ไผ่ (Bamboo Charcoal) 29
2.6.1 การใช้ประโยชน์จากถ่านไม้ไผ่ 29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 33
3.1 การศึกษาและคัดเลือกเตาสำหรับทดสอบ 33
3.1.1 เตาเบ็บซี (BEBC Stove) 33
3.1.2 เตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้ 34
3.2 การออกแบบ และจัดสร้างเตาต้นแบบ 35
3.3 การดำเนินการศึกษาวิจัย 37
3.4 การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร 38
3.4.1 การวัดอัตราการไหลของอากาศจากแกนเตาระหว่างการเผาไหม้ 40
3.4.2 การวัดค่าอุณหภูมิเตาในแต่ละตำแหน่ง 41
3.4.3 วิเคราะห์อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในเตา 42

3.4.4 วิเคราะห์ร้อยละของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตา 42
3.4.5 วิเคราะห์ร้อยละของแก๊สไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากเตา 42
3.4.7 วิเคราะห์สัณฐานและส่วนประกอบของถ่าน โดยใช้กล้องโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 43
3.4.8 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis) ของถ่าน.....44
บทที่ 4 ผลการวิจัย 47
4.1 การไหลของอากาศหลังการเผาไหม้ 47
4.2 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา.....49
4.3 การวิเคราะห์อัตราการความร้อน 55
4.4 ผลผลิตถ่านชีวภาพและปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง.....59
4.5 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ.....60
4.5 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมี.....61
4.6 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis).....64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....65
5.1 สรุปผลการศึกษา 65
บรรณานุกรม 67
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร 80
ภาคผนวก ข ภาพแสดงการสร้างแกนเตาและการทดสอบเตา.....108
ประวัติผู้เขียน 112

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบ ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 18

ตารางที่ 2 วิธีการทดสอบเตา 37

ตารางที่ 3 ข้อมูลทางสถิติของอัตราการไหลของอากาศจากแกนเตาแบบ NCCS และ ECCS 48

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราการไหลของแกนเตาแบบ NCCS และ ECCS.....49

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาของอุณหภูมิภายในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 L ที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS.....51

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ ANOVA ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS.....54

ตารางที่ 7 ข้อมูลทางสถิติของอัตราความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS 56

ตารางที่ 8 ข้อมูลน้ำหนักถ่านชีวภาพ (เฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง).....59

ตารางที่ 9 ข้อมูลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชีวภาพไม้ไผ่ 64

ตารางที่ 10 ผลการวัดอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS 81

ตารางที่ 11 ตารางผลการวัดอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS.....94

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น.....11

ภาพที่ 2 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง.....12

ภาพที่ 3 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขวาง.....13

ภาพที่ 4 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Inverted downdraft.....14

ภาพที่ 5 แสดงเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล.....15

ภาพที่ 6 แสดงการเผาไหม้โดยตรงของชีวมวล.....16

ภาพที่ 7 แสดงกระบวนการ Pyrolysis.....17

ภาพที่ 8 ขั้นตอนการไพโรไลซิส.....21

ภาพที่ 9 เตาเบ็บซี ก) ลักษณะการใช้งานและถ่านชีวภาพจากเตา ข) แกนเตาและสภาพภายในเตา 34

ภาพที่ 10 เตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้ (ก) ลักษณะของเตา (ข) ลักษณะการจุดเตา.....35

ภาพที่ 11 รายละเอียดเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร และแกนเตาแบบ NCCS ที่ทำการออกแบบใหม่.....36

ภาพที่ 12 การสร้างแกนเตาและตัวเตาโดยใช้วัสดุรีไซเคิลจากถังน้ำยาแอร์.....37

ภาพที่ 13 ลักษณะของฟืนไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดสอบ.....39

ภาพที่ 14 การชั่งน้ำหนักไม้ไผ่ที่บรรจุเข้าเตา.....39

ภาพที่ 15 การวางเตาและติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในเตา.....39

ภาพที่ 16 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากแกนเผาไหม้.....40

ภาพที่ 17 a) แสดงเครื่องมือวัดอัตราการไหล b) เครื่องมือวัดและบันทึกอุณหภูมิ c) ตำแหน่งการวัดอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิต่าง ๆ.....41

ภาพที่ 18 เครื่อง FTIR รุ่น Frontier and Spotlight 200i ยี่ห้อ Perkin Elmer.....43

ภาพที่ 19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (EDS) 44

ภาพที่ 20 อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนทางออกของประเภท NCCS และ ECCS 48

ภาพที่ 21 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS 50

ภาพที่ 22 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS.....52

ภาพที่ 23 ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS 53

ภาพที่ 24 ค่าเฉลี่ยอัตราความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในเตาเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS.55

ภาพที่ 25 ค่าเฉลี่ยอัตราความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในเตาเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS 56

ภาพที่ 26 ลักษณะของถ่านที่ได้จากเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ (a) แกนเตาแบบ ECCS และ (b) แกนเตาแบบ NCCS 58

ภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ของเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS (เส้นสีน้ำเงิน) และแบบ ECCS (เส้นสีแดง) 61

ภาพที่ 28 แสดงรูพรุนภายในของถ่านชีวภาพเมื่อใช้แกนเตาแบบ NCCS 63

ภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุจากรังสีเอ็กซ์ (EDS) 63

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การพัฒนาเตาชีวมวลระดับครัวเรือนเป็นหนึ่งในแนวทางการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนทดแทนการใช้พลังงานฟอสซิล โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้ม (LPG) ซึ่งมีสัดส่วนการใช้งานในครัวเรือนสูงถึงร้อยละ 72.2 ของเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการหุงต้มอาหารในครัวเรือน ตามข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติ ในปี 2563 นอกจากนั้นในปัจจุบันแก๊สหุงต้มมีราคาสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในครัวเรือนสูงขึ้นตามไปด้วย

การพัฒนาเทคโนโลยีเตาชีวมวลจะใช้กระบวนการทางด้านเคมีความร้อน ให้เกิดการแปรรูปพลังงานที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้มในครัวเรือน กระบวนการที่นำมาใช้ในเตาชีวมวลส่วนใหญ่มักถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification Reaction) ซึ่งขณะเกิดปฏิกิริยาภายใต้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น จะทำให้เกิดกระบวนการหลักๆ ใน 4 กระบวนการ คือ กระบวนการอบแห้ง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชั่น ภายในเตาปฏิกรณ์ที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ เตาแก๊สซิไฟเออร์ (Gasifier Stove) ซึ่งสามารถนำมาใช้กับชีวมวลได้หลากหลายประเภท อาทิ เศษไม้ ฟางข้าว แกลบ เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

นอกจากการศึกษาเตาแก๊สซิไฟเออร์แล้ว ยังมีการศึกษาที่น่าสนใจเกี่ยวกับการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพ ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process) ที่ใช้ในการเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ในสภาวะการทำงานจำกัดหรือปราศจากอากาศ ด้วยกระบวนการดังกล่าวจะจะทำให้เกิดเชื้อเพลิงชีวภาพ 3 ชนิดหลัก ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) แก๊ส และถ่านชีวภาพ (Bio-Char) ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้นอกจากจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงแล้ว ยังใช้สำหรับการปรับปรุงบำรุงดิน ด้วยคุณลักษณะที่มีความพรุนสูง สามารถดูดซับน้ำ แร่ธาตุ และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ จึงเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนั้นกระบวนการไพโรไลซิสยังสามารถกักเก็บคาร์บอนคงตัวในถ่านชีวภาพได้มาก จึงเป็นหนึ่งเทคโนโลยีที่สำคัญของการกักเก็บคาร์บอนเพื่อช่วยลดภาวะเรือนกระจก และลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย

ตัวอย่างของการพัฒนาเตาชีวมวลที่มีการใช้งานในลักษณะเตาหุงต้มควบคู่กับการใช้ผลิตถ่านชีวภาพ ตามการศึกษาในงานวิจัยของกันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ, 2017 ในลักษณะเตา

ทรงกระบอก 2 ชั้นบริเวณแกนกลางของเตา ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง เพื่อให้ความร้อนในการหุงต้ม ขณะที่บริเวณชั้นเปลือกของตัวเตา ถูกใช้สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ โดยอาศัยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ในท่อแกนกลาง ซึ่งจะถูกส่งถ่ายจากบริเวณผนังท่อมายังชีวมวลทำให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อน ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า จนได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าเตาที่ได้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยร้อยละ 29.67 มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 14.11 g/min ตามผลการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ใน 3 ประเภท ได้แก่ ซังข้าวโพด กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน และยังพบว่าเตาชีวมวลที่ได้รับการพัฒนาให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ค่อนข้างสูงเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากับเตาในลักษณะใกล้เคียง แต่ยังพบปัญหาที่เกิดจากควันขณะจุดเตา และบริเวณช่องเผาไหม้ ซึ่งควรจะต้องได้รับการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้เหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์จริงในชุมชน

เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ ถือเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ช่วยลดก๊าซเรือนกระจก และสร้างความสมดุลในวัฏจักรคาร์บอนอย่างเป็นระบบ ทั้งนี้เพราะถ่านชีวภาพ หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทางด้านเคมีความร้อน ที่เรียกว่า ไพโรไลซิส จะมีลักษณะที่แตกต่างจากถ่านที่ผ่านการเผาโดยตรง คือ สามารถสะสมคาร์บอนเสถียรเป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพในปริมาณสูง จึงสามารถใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพในการเก็บกักคาร์บอนภายในดิน ซึ่งเป็นคาร์บอนที่เสถียรยากต่อการเปลี่ยนสภาพ สามารถคงสภาพในธรรมชาติได้ในระยะเวลา 100 – 1,000 ปี ดังนั้นหากทำการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้อยู่รูปของถ่านชีวภาพเพื่อเก็บกักคาร์บอน จึงเปรียบเสมือนเป็นการดึงคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศคืนสู่ธรรมชาติ โดยอาศัยถ่านชีวภาพเป็นตัวกลางในการกักเก็บ ทำให้ถ่านชีวภาพได้รับการยอมรับจากอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการต่อสู้การเสื่อมสภาพดิน (UNCCD) ให้เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีการแก้ไขปัญหาโลกร้อน และเป็นเครื่องมือในการฟื้นฟูสภาพดิน ในการประชุมอนุสัญญาสหประชาชาติ ที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกในเดือนธันวาคม 2552 ที่เมืองโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ค หรือเรียกได้ว่าเป็น Carbon Negative Technology ที่มีการรวมกลุ่มการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในรูปแบบของเครือข่ายถ่านชีวภาพในระดับนานาชาติ หรือ Interational Biochar Initiative (IBI) อีกด้วย (Chaiwong, 2012)

นอกจากคุณสมบัติด้านการกักเก็บคาร์บอนแล้ว ถ่านชีวภาพยังได้รับความสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรและการปรับปรุงดิน ทั้งนี้เพราะมีความพรุนสูง และมีขนาดของรูพรุนที่มีความเหมาะสมต่อการสะสมสารอาหาร และน้ำภายในดิน จึงช่วยเพิ่มพื้นผิว ทำให้เกิดความร่วมซุยของดิน เพิ่มการแตกแขนงของรากที่ใช้ในการดูดซึมสารอาหาร และเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต

ของพืช ดังในงานวิจัยของ Asai และ คณะ, 2009 ได้ทำการศึกษาถึงผลของการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดิน สำหรับการปลูกข้าวในบริเวณทางตอนเหนือของลาว แล้วพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ปลูกและผลผลิตที่ได้ พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของข้าวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการเพิ่มถ่านชีวภาพ และมีปริมาณของธาตุอาหารกลุ่มไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลลังกล่าวยังขึ้นอยู่กับสภาพดิน และองค์ประกอบของดินชนิดที่ใช้ในการเพาะปลูกเป็นสำคัญด้วย Hidetoshi, 2009 เช่นเดียวกันการศึกษาของ Peng และคณะ, 2011 ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของการเติมถ่านชีวภาพที่มีการผลิตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ และใช้ระยะเวลาในกระบวนการผลิตแตกต่างกัน สำหรับการปรับปรุงดินเพื่อปลูกข้าวโพดทางเขตร้อนในประเทศจีน ผลการศึกษาพบว่า ดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพ มีค่า PH เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.1-4.6 แตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพตั้งแต่ 250-450 องศาเซลเซียส และมีค่า CEC หรือ ค่าความจุในการแลกประจุบวกในดินเพิ่มขึ้น 3.9-17.3% โดยไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในพื้นที่เพาะปลูก นอกจากนั้นยังพบอีกว่า อัตราการเจริญเติบโตของข้าวโพดมีอัตราเพิ่มสูงถึง 64 % ในดินที่ไม่มีการเติม N P K และสูงถึง 146% ในดินที่มีการเติมปุ๋ยกลุ่ม N P K (มูลนิธิวิกิมีเดีย, 2557) นอกจากถ่านชีวภาพจะให้ผลดีในการปรับปรุงดินที่กล่าวไปแล้วนั้น ถ่านชีวภาพยังช่วยลดปริมาณก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_20) ซึ่งเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่เป็นต้นเหตุสำคัญมาจากการใช้ปุ๋ยและสารเคมีทางการเกษตร และมีความรุนแรงที่ส่งผลต่อภาวะโลกร้อน มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 298 เท่า [Peng, 2011]

ดังในการศึกษาของ Kumar และคณะ (Kumar, 2013) ได้สรุปรวบรวมงานวิจัยที่ทำการออกแบบเทคโนโลยีการผลิตเตาชีวมวลในระดับครัวเรือน และได้แบ่งประเภทของเตาชีวมวลตามลักษณะพื้นฐานของตัวเตา เช่น วัสดุในการจัดสร้าง รูปแบบของการป้อนอากาศเข้าภายในเตา รวมถึงการแยกชนิดของเตาตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง เช่น เตาที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรถูกแบ่งตามลักษณะของท่อส่งผ่านความร้อน โดยปรับรูปแบบของตัวท่อเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ รูปแบบท่อเดี่ยวแบบง่าย (The Simple Tube Stove) รูปแบบท่อรวม (The Multi-Port Pulverized Stove) และรูปแบบผสมผสาน (The Typical Configuration of A Single-port and Multiport Pulverized Fuel Stove) ผลการศึกษาเปรียบเทียบทำให้ทราบถึงข้อดีข้อเสียของเตาและประเภท และมีการพัฒนาเตาเพื่อใช้งาน จริง รวมถึงการพัฒนาเพื่อจำหน่ายในหลายรูปแบบ ซึ่งมีการออกแบบ และพัฒนาในหลากหลายรูปแบบ ทั้งในลักษณะที่มีการป้อนเชื้อเพลิงและมีการให้ความร้อนจากทางด้านบน รูปแบบที่มีการควบคุมอัตราการ ไหลของอากาศ

และการให้มีการไหลของอากาศโดยธรรมชาติ ลักษณะเตาที่มีการให้ความร้อนจากทางด้านล่างซึ่งลักษณะควบคุมและป้อนเชื้อเพลิงคล้ายกับเตาเผาเชื้อเพลิงแข็งที่มีการใช้โดยทั่วไปในครัวเรือน รวมถึงรูปแบบการใช้วัสดุในการจัดสร้างที่แตกต่างกัน เช่น ใช้ปูน และเหล็กในการประกอบโครงสร้าง หลักนอกจากนั้นยังมีการพัฒนาลักษณะเตาเป็นแบบเตาที่มีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องจาก ซึ่งลักษณะเตาที่ทำการพัฒนาแต่ละประเภทจะถูกเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ และชนิดของชีวมวลที่ใช้ ซึ่งในพื้นที่ของผู้ศึกษามีไม้ไผ่เลี้ยงจำนวนมาก ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ จึงให้ความสนใจในการศึกษาถึงการออกแบบเตาในลักษณะเตาแก๊สซิไฟเออร์สำหรับใช้ให้ความร้อนควบคู่ไปกับการนำไปใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยการเลือกใช้ชีวมวลมีมากและหางานในชุมชน คือ ไม้ไผ่เลี้ยง เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะของเตา โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิ และผลด้านคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างเตาต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาแล้วกับเตาที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่มีในท้องตลาด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน

1.2.2 เพื่อทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิของเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ที่มีในท้องตลาดและเตาต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาแล้ว

1.2.3 เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ที่มีในท้องตลาดและเตาต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาแล้ว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อปรับปรุง และออกแบบเตาต้นแบบ สำหรับทดสอบการใช้งานและศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพ

1.3.2 ทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพกับของเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีในจังหวัดกาฬสินธุ์ ได้แก่ ไม้ไผ่แห้ง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบ และการพัฒนาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน ขนาด 50 ลิตร

1.4.2 ได้พัฒนาเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน ขนาด 50 ลิตรที่มีสมรรถนะดีขึ้น

1.4.3 ได้ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ที่ได้รับการพัฒนาแล้วมีคุณสมบัติดีขึ้น

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.5.1 โซนแก๊สซิฟิเคชั่น หมายถึง ส่วนที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

1.5.2 โซนไพโรไลซิส หมายถึง ส่วนที่มีการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อนในสภาวะที่อับอากาศ

1.5.3 โปรดิวเซอร์แก๊ส หมายถึง แก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เตาหุงต้มชีวมวล (Biomass Cooking Stove)

เตาหุงต้มเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อวิถีชีวิตประจำวันของมนุษย์ทุกคน เป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับใช้หุงต้มอาหารให้สุกเพื่อการบริโภคในชีวิตประจำวัน การใช้เตาหุงต้ม เริ่มมีมาตั้งแต่ยุคที่มนุษย์เริ่มรู้จักการทำอาหารให้สุกจนถึงปัจจุบัน ในสมัยก่อนเตาหุงต้มที่ใช้ก็เป็นเตาหุงต้มอย่างง่ายที่ประกอบด้วยหิน 3 ก้อนที่เรียกว่าเตาหิน 3 ก้อน ซึ่งถือว่าเป็นภูมิปัญญาแรกเริ่มของมนุษย์ในด้านการปรุงอาหารจากเตาหิน 3 ก้อนก็ได้มีการพัฒนาเตาหุงต้มในรูปแบบใหม่เกิดขึ้นทั่วทุกมุมโลก

ถึงแม้ว่าจะมีเตาหุงต้มในรูปแบบใหม่เกิดขึ้นทั่วทุกมุมโลก แต่ประชากรส่วนใหญ่ในประเทศกำลังพัฒนาก็ยังใช้เตาหิน 3 ก้อนเป็นเตาหุงต้มในชีวิตประจำวันสำหรับการหุงต้มอาหาร เตาหิน 3 ก้อนนี้โดยทั่วไปแล้วพบว่า สกปรก อันตราย และมีประสิทธิภาพต่ำ สกปรกเนื่องจากมีควันและเขม่าที่ติดตามอุปกรณ์ในครัว กำแพง ฝ้า และมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ อันตรายเพราะไม่มีการควบคุม ไฟสามารถลุกลามออกนอกเตาได้ง่าย ก่อให้เกิดไฟไหม้ขึ้น นอกจากนี้ควันไฟยังก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำลายสุขภาพ สำหรับประสิทธิภาพที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการสูญเสียปริมาณความร้อนเป็นจำนวนมาก ทำให้มีการนำปริมาณความร้อนเพียงส่วนน้อยมาใช้ประโยชน์

ในขณะเดียวกันเตาหิน 3 ก้อนก็มีข้อดีเช่นกัน คือไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย และมีความยืดหยุ่นสามารถหุงต้มเร็วหรือช้าก็ได้ ให้แสงสว่าง ความร้อน และใช้เป็นที่สำหรับการประชุม สังสรรค์ นอกจากนี้ควันไฟยังช่วยป้องกันยุงและแมลงวันไม่ให้มารบกวน และใช้ในการถนอมอาหาร ส่วนทาร์ที่ติดอยู่ตามหลังคาจาก ก็ช่วยป้องกันจาก ทำให้ยืดอายุการใช้งานของจากและไม่ใช่ความบังเอิญที่เตาหิน 3 ก้อนมีใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่มีเหตุผลที่ใช้เตาหิน 3 ก้อนกันอย่างพึงพอใจ

สำหรับการปรับปรุงเตาหุงต้มก็เพื่อหาทางที่จะพัฒนาเตาหุงต้มที่จะมาทดแทนเตาหิน 3 ก้อน ซึ่งจะต้องมีข้อดี 1 หรือหลายๆข้อ สำหรับผู้ใช้เช่น การประหยัดเชื้อเพลิง มีความสะอาด และความปลอดภัยเป็นต้น จากเตาหิน 3 ก้อนก็จะได้มีการพัฒนารูปแบบของเตาหุงต้มเกิดขึ้นทั่วทุกมุมโลก จนเกิดเป็นเตาหุงต้มในลักษณะต่าง ๆ ตามแต่ละภูมิภาค เช่น เตาหุงต้มแบบ Chula ของอินเดีย เตาหุงต้ม jiko ของเคนย่าหรือเตาหุงต้มแบบถังของไทย เป็นต้นเตาหุงต้มในระยะแรกนี้เป็นเตาหุงต้มที่ผลิตขึ้นมาเพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน โดยที่ยังไม่ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานมากนัก รูปแบบจึง

ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าต้องการแบบใด เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการของตลาด ข้อสำคัญความมีราคาที่ไม่แพงเกินไป พอเหมาะพอควรกับรายได้ของประชากรในท้องถิ่นนั้น ๆ

ประชากรส่วนใหญ่ในโลกนี้อาศัยอยู่ในชนบท โดยเฉพาะชนบทของประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งมีชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานสำคัญ เตาหุงต้มส่วนใหญ่ในโลกนี้จึงเป็นเตาหุงต้มที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง สำหรับชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงก็ขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ว่ามีชีวมวลชนิดใดอยู่ อาจจะเป็นไม้ฟืนหรือเศษวัสดุทางการเกษตร แต่เตาหุงต้มชีวมวลที่มีการใช้มากที่สุดคือ เตาฟืน (Firewood stove) เตาฟืนที่ใช้กันอยู่ทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาไม่ว่าจะเป็นในเอเชีย อัฟริกาหรือลาตินอเมริกา ส่วนในยุโรปและอเมริกาเหนือ ซึ่งเป็นกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วมีการใช้เตาฟืนค่อนข้างน้อย

2.1.1 ชนิดของเตาหุงต้ม

เตาหุงต้มแบ่งออกได้หลายชนิด แต่ละชนิดมีวิธีใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้งานของแต่ละคน ดังต่อไปนี้

เตาฟืน (Firewood stove) เตาฟืนเป็นเตาหุงต้มที่มีใช้กันอยู่ทั่วโลก เป็นเตาหุงต้มที่มนุษย์รู้จักกันดีที่สุด เชื้อเพลิงที่ใช้ก็เป็นสิ่งที่หาได้ง่ายในพื้นที่ชนบททั่ว ๆ ไป และข้อสำคัญเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ต้องซื้อ ด้วยเหตุนี้เตาฟืนจึงได้รับความนิยมมากกว่าเตาหุงต้มชนิดอื่น ๆ สำหรับประเทศไทยประชากรส่วนใหญ่ในชนบทยังใช้เตาฟืนในการหุงหาอาหารในชีวิตประจำวันกันอยู่ ข้อดีในการใช้เตาฟืนคือในพื้นที่ชนบทหาฟืนได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย การใช้เตาฟืนจึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

เตาถ่าน (Charcoal stove) ถ่านเป็นเชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมมากกว่าฟืนโดยเฉพาะในชุมชนเมือง ซึ่งมีสาเหตุสำคัญมาจากความจริงที่ว่า ถ่านมีการเผาไหม้ที่สะอาด ไม่มีควันและมีค่าพลังงานความร้อนเกือบ 2 เท่าต่อหน่วยน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับฟืน นอกจากนี้ถ่านยังขนส่งได้ง่ายกว่าและเสียค่าใช้จ่ายถูกกว่าฟืน ถ่านเป็นเชื้อเพลิงทุติยภูมิที่ผ่านการแปรรูปมาแล้ว ทำให้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีควัน มีการเผาไหม้ที่สะอาด มีมลภาวะน้อยและทำให้เตาหุงต้มไม่จำเป็นต้องมีปล่องควัน ปกติจะจุดเตาถ่านภายนอกบ้านแล้วนำมาหุงต้มภายในบ้าน

เตาหุงต้มแก๊สซิไฟเออร์ (Gasifier stove) เป็นเตาหุงต้มที่พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยหลักการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น ซึ่งแตกต่างจากการหุงต้มที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของการเผาไหม้โดยตรง สำหรับหลักการของแก๊สซิฟิเคชั่นเป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สก่อน แล้วจึงทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สในลำดับต่อมา ผลจากวิธีการนี้ทำให้เกิดการเผา

ไหม้ที่สะอาด ไม่มีเขม่าและควัน ทำให้เตาหุงต้มชนิดนี้เป็นเตาหุงต้มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เตาหุงต้มแก๊สซิไฟเออร์จึงเป็นเตาแก๊สในความหวังของประชากรที่ยากจน ในประเทศโลกที่สาม เตาหุงต้มแก๊สซิไฟเออร์ที่ประสบความสำเร็จจนเป็นตัวอย่างให้มีการศึกษาวิจัย พัฒนากันอย่างกว้างขวางขึ้นทั่วทุกมุมโลกคือเตา Turbo stove ที่พัฒนาโดย Thomas Reed

เตาหุงต้มมวลหนักที่มีปล่อง (High-Mass Chimney Stove) งานในระยะแรกที่เกี่ยวกับการปรับปรุงเตาหุงต้ม ส่วนมากจะรวมศูนย์ที่เตาหุงต้มขนาดหนัก ที่อยู่กับที่และมีหัวเตาหลายๆหัว พร้อมด้วยปล่องควันและตัวควบคุมอากาศ ทำด้วยอิฐและซีเมนต์ ปัญหาหลักของเตาหุงต้มชนิดนี้คือมีราคาแพง ไม่ประหยัดเชื้อเพลิง เนื่องจากต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการใช้ความร้อนแก่วัสดุที่ใช้ทำเตา การดูดกลืนความร้อนที่มากเกินไปของตัวเตาหุงต้ม ทำให้เหลือความร้อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์น้อยลง

เตาหุงต้มหัวเดียวที่ไม่มีปล่อง จากประสบการณ์ในการทดลองเตาหุงต้มในโครงการต่างๆ พบว่าเตาหุงต้มหัวเดียวไม่มีปล่องโดยปกติทั่วไปแล้วเป็นเตาหุงต้มที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในทางปฏิบัติในความเป็นจริง ถึงแม้จะมีเตาหุงต้มหลายหัวที่หุงต้มพร้อมกัน การใช้เตาหุงต้มแบบหัวเดียวจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

เตาหุงต้มที่สร้างขึ้นเองภายในครัวเรือนส่วนใหญ่มักจะใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่น เช่น โคลนหรือทรายปนดินเหนียว บางครั้งก็ผสมกับฟาง มูลสัตว์หรือซีเมนต์ เพื่อเสริมความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งโดยปกติช่วงอายุการใช้งานมีค่อนข้างจำกัด ตัวอย่างเช่น เตาแบบ louga ที่เซเนกัล ซึ่งมีอายุการใช้งานน้อยกว่า 1 ปี ในการยืดอายุการใช้งานต้องเคลือบด้วยกระเบื้องดินเผา (เซรามิค) ในโครงสร้างเพื่อรองรับภาชนะที่ใช้ในการหุงต้ม การฝึกอบรมการใช้และข้อมูลต่างๆของเตาหุงต้มก็มีความสำคัญต่อการยืดอายุการใช้งาน

เตาหุงต้มชนิด 2 หัวเตา ไม่มีปล่อง ที่ประเทศศรีลังกาและอินโดนีเซีย เตาหุงต้มชนิด 2 หัวได้รับความนิยมมากกว่าเตาหุงต้มชนิดหัวเดียว การออกแบบเตาหุงต้มชนิดหนึ่งคือเตาแบบ Tungku Lowon ซึ่งทำด้วยดินโคลน แต่มีปัญหาในเรื่องอายุการใช้งานที่สั้นและความยุ่งยากในการควบคุมคุณภาพในการผลิตในโครงการ Tungku Lowon จึงต้องทำการควบคุมคุณภาพการผลิตอย่างเข้มงวด เนื่องจากประสิทธิภาพของเตาหุงต้มขึ้นอยู่กับขนาดที่ถูกต้องของห้องเผาไหม้เป็นอย่างมาก แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหานี้คือการใช้เครื่องปั้นดินเผาโดยผู้ผลิตที่ผ่านการฝึกมาเป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากทำให้อายุการใช้งานของเตาหุงต้มนานขึ้นแล้ว ประสิทธิภาพของเตาหุงต้มก็ยังสูงขึ้นอีกด้วย ในขณะที่

ราคาเพิ่มขึ้นไม่มาก เตาหุงต้มชนิดนี้เรียกว่า Tungku Sae และเตาหุงต้ม Tungku Sae ประสบความสำเร็จทั้งในประเทศศรีลังกาและอินโดนีเซีย

เตาหุงต้มมวลเบาที่มีปล่อง ในพื้นที่หลายๆแห่ง ควันที่เกิดจากการหุงต้มเป็นปัญหาที่สำคัญกว่าและสาหัสกว่าการขาดเชื้อเพลิง นอกจากราคาที่เพิ่มขึ้นแล้ว เตาหุงต้มแบบมีปล่องได้รับความนิยมมากกว่าเตาหุงต้มแบบไม่มีปล่อง เตาหุงต้มที่ทำขึ้นเองภายในบ้าน (Home made) การออกแบบเตาหุงต้มมวลเบาที่มีปล่องให้มีมวลเบาและออกแบบให้สร้างง่าย เช่น เตาหุงต้มแบบ Nada Chula ซึ่งเตาหุงต้มแบบ Nada Chula ก็จะเหมือนกับเตาหุงต้มชนิดอื่นๆ สิ่งสำคัญสำหรับเตาหุงต้มแบบ Nada Chula คือต้องเข้าใจวิธีการสร้างเตาหุงต้มและวิธีการใช้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการขยายโครงการฝึกอบรมและการติดตามผลจึงเป็นสิ่งจำเป็น รวมทั้งการมีคู่มือการสร้างเตาหุงต้มที่ถูกต้องเป็นภาษาพื้นเมืองสำหรับฝึกอบรมคนสร้างเตา

ในงานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นที่เตาหุงต้มแก๊สซิไฟเออร์ (Gasifier stove) จึงไม่ได้กล่าวถึงเตาหุงต้นชนิดอื่นๆ

2.2 เตาก๊าซซิไฟเออร์ (Gasifier)

เทคโนโลยีการแปรรูปเชื้อเพลิงให้กลายเป็นพลังงานความร้อนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่ง คือการใช้กระบวนการก๊าซซิฟิเคชั่น (Gasification) ซึ่งมีข้อดีคือสามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของก๊าซเชื้อเพลิง ทำให้สะดวกในการใช้งาน สามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ดี และสามารถควบคุมมลภาวะจากการเผาไหม้ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ง่าย การประยุกต์ใช้เตาก๊าซซิไฟเออร์ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนในภาคอุตสาหกรรมได้

2.2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification)

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยน เชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส เรียกว่าแก๊สชีวมวล หรือ Producer Gas แก๊สที่ได้นี้ สามารถนำไปใช้ในการขับเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือใช้ในกระบวนการให้ความร้อนต่างๆ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion) ปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดเป็นแก๊สเชื้อเพลิง กล่าวคือแก๊สซิฟิเคชั่นเป็นกระบวนการที่ใช้ในเตาแก๊สซิไฟเออร์ ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบคุมให้เกิดการเผาไหม้พียงบางส่วนได้ (Partial Combustion) แก๊สซีไฟเออร์สามารถจำแนกตามลักษณะการไหลของอากาศภายในเตาแก๊สซิไฟเออร์ออกเป็น 4 ชนิดดังนี้

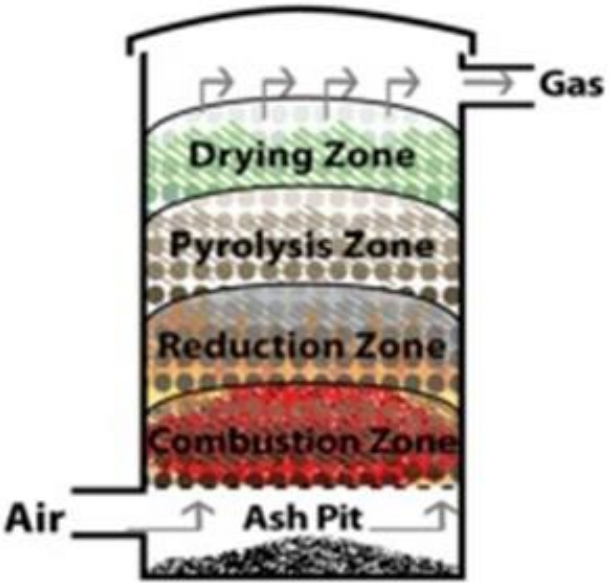
1. เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier)
2. เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier)
3. เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขวาง (Crossdraft Gasifier)
4. เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Inverted downdraft

เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifler)

เตาประเภทนี้เป็นเตาเผาที่ผลิตใช้เริ่มแรก และเป็นแบบง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่าน เข้ามาทางด้านล่างบริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไป จะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเราเรียกบริเวณส่วนนี้ว่าโซนเผาไหม้ (Combustion zone) เมื่ออากาศผ่านเข้าไปบริเวณโซนนี้ จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก๊าซร้อนที่ผ่านจากโซนเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิสูง และจะถูกส่งผ่านไปยังโซนรีดักชัน ซึ่งเป็นโซนที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นก๊าซจะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลที่ชื้น เนื่องจากก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้น ทำให้ก๊าซที่ออกจากเตาเผาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง

เตาเผาประเภทนี้จะไม่ซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมาก และแก๊สชีวมวลที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัด คือ แก๊สที่ผลิตได้จะมีน้ำมันดิน (Tar) เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ในโซนไพโรไลซิส และจะกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกวา ดังนั้นแกสที่ได้จากเตาเผาประเภทนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้สำหรับหม้อน้ำ หรือการอบแห้งวัสดุทางเกษตรในโซนไพโรไลซิส และจะกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นแก๊สที่ได้จากเตาเผาจะผสมกับอากาศ และทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

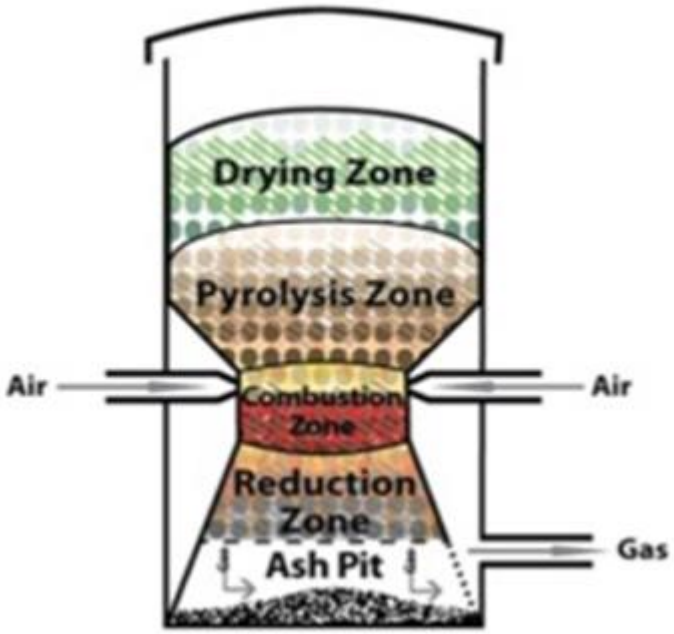


ภาพที่ 1 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น

เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier)

ลักษณะพิเศษของแก๊สไฟเออร์ชนิดไหลลง คือบริเวณโซนเผาไหม้ (Combustion Zone)จะออกแบบให้มีลักษณะเป็นคอคอด ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดน้อย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อยู่ในบริเวณแคบๆ อุณหภูมิจะได้สูงมาก ส่วนโซนรีดักชั่นนั้น ต้องการให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดจากโซนเผาไหม้มาสัมผัส กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังลุกไหม้อยู่บริเวณนี้ จึงจัดให้มีพื้นที่มากพอ และนอกจากนี้ยังต้องการให้มีเวลาให้ก๊าซสัมผัสกับเชื้อเพลิงชีวมวลมากจึงต้องเพิ่มพื้นที่ในบริเวณนี้ขึ้น เพื่อลดความเร็วของก๊าซลง

เนื่องจากน้ำมันดิน และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะต้องผ่านโซนสันดาปก่อนที่จะออกไปพร้อมกับ Producer Gas ทางด้านล่างของเตาแก๊สซิไฟเออร์ ดังนั้นโมเลกุลของ น้ำมันดิน และไอน้ำจึงแตกสลายออก ทำให้ได้ก๊าซที่ได้มีความสะอาดกว่าแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขึ้น

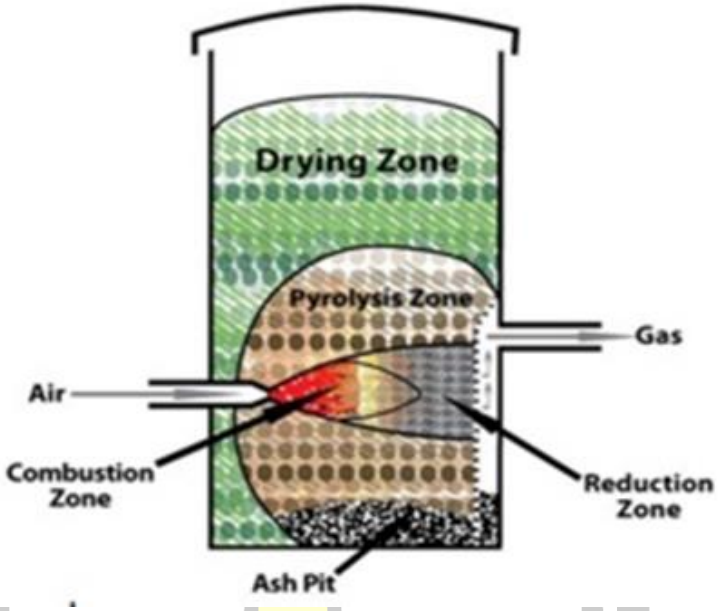


ภาพที่ 2 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง

เตาเก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขวาง (Crossdraft Gasifier)

แก๊สซิไฟเออร์ชนิดนี้อากาศจะถูกนำเข้ามาด้านข้างของเตาแก๊สซิไฟเออร์ และเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณตรงกลาง ส่วนก๊าซที่ได้จะออกไปในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้และก๊าซตรงกลางไม่สัมผัสกับผนังของเตาโดยตรง ทำให้ไม่ต้องมีการบุผนัง ซึ่งเป็นข้อดีของแก๊สซิไฟเออร์ชนิดนี้ แต่การควบคุมการเกิดการเผาไหม้ลำบากทำให้ก๊าซที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้แก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขวางไม่ได้รับความนิยม

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

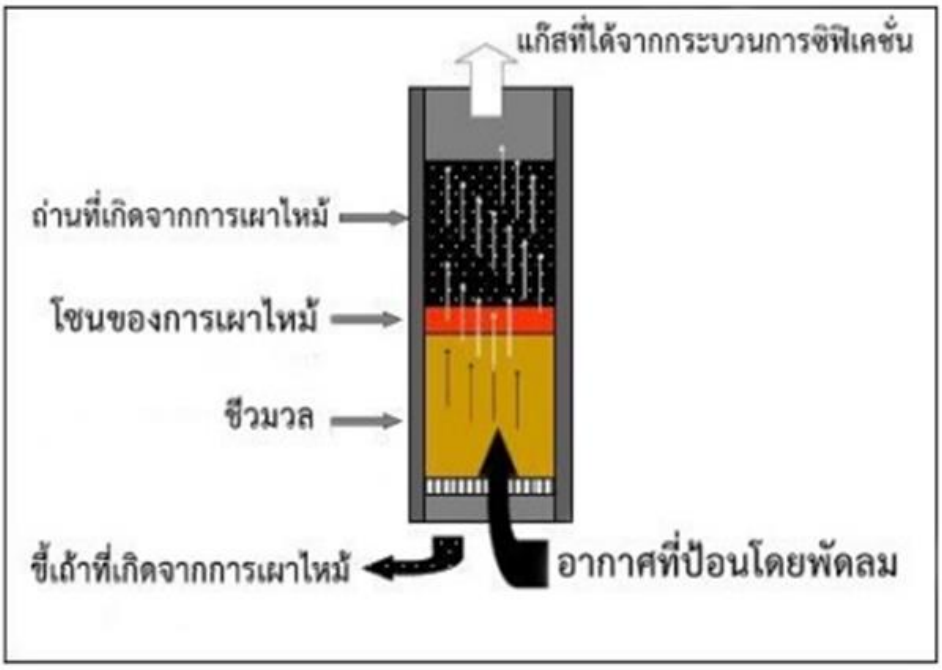


ภาพที่ 3 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลขวาง

เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Inverted downdraft

เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Inverted Down-draft อากาศจะถูกนำเข้าจากด้านล่าง และมีการเผาไหม้จากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตา โดยทำให้โปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้มีความสะอาดขึ้น เนื่องจากแก๊สชีวมวลที่ได้ผ่านชั้นของการเผาไหม้ (Combustion) ทำให้น้ำมันดินที่อยู่ในแก๊สชีวมวล เกิดการแตกตัวกลายเป็นแก๊ส ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหารในครัวเรือนได้ซึ่งลักษณะการเผาไหม้ของแก๊สที่ได้ จะคล้ายกับการใช้แก๊สหุงต้ม ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 1.5 กิโลกรัม ใช้ได้ประมาณ 30-45 นาที

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

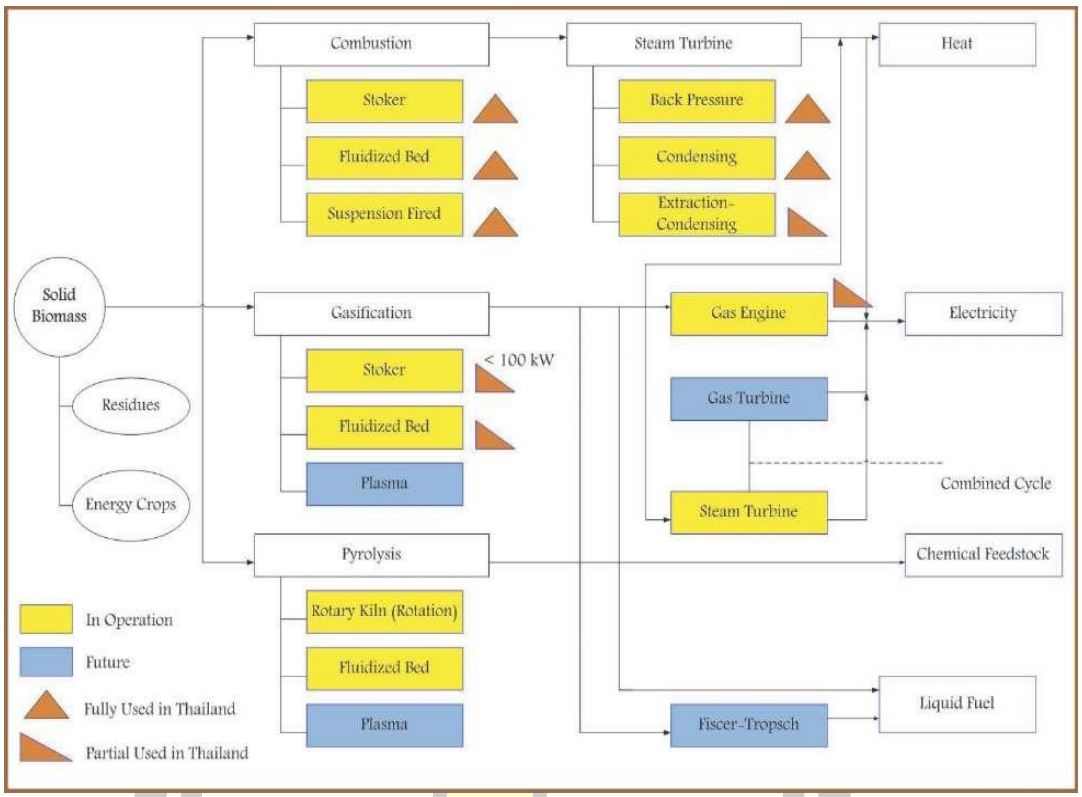


ภาพที่ 4 เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Inverted downdraft

2.3 เทคโนโลยีการเผาไหม้ชีวมวล

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงพาณิชย์ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งชีวมวลที่นำมาใช้ได้มาจากเศษวัสดุเหลือใช้ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิต เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานได้หลายวิธี ได้แก่

1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)
2. การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical conversion) ประกอบด้วย
   a) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)
   b) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification)
   c) กระบวนการลิขวิดแฟคชั่น (Liquidfaction)
   d) การใช้ชีวเคมีสลายโมเลกุล (Biochemicalconversion) ประกอบด้วย
      - กระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobicdigestion)
      - กระบวนการหมัก (Yeast fermentation)

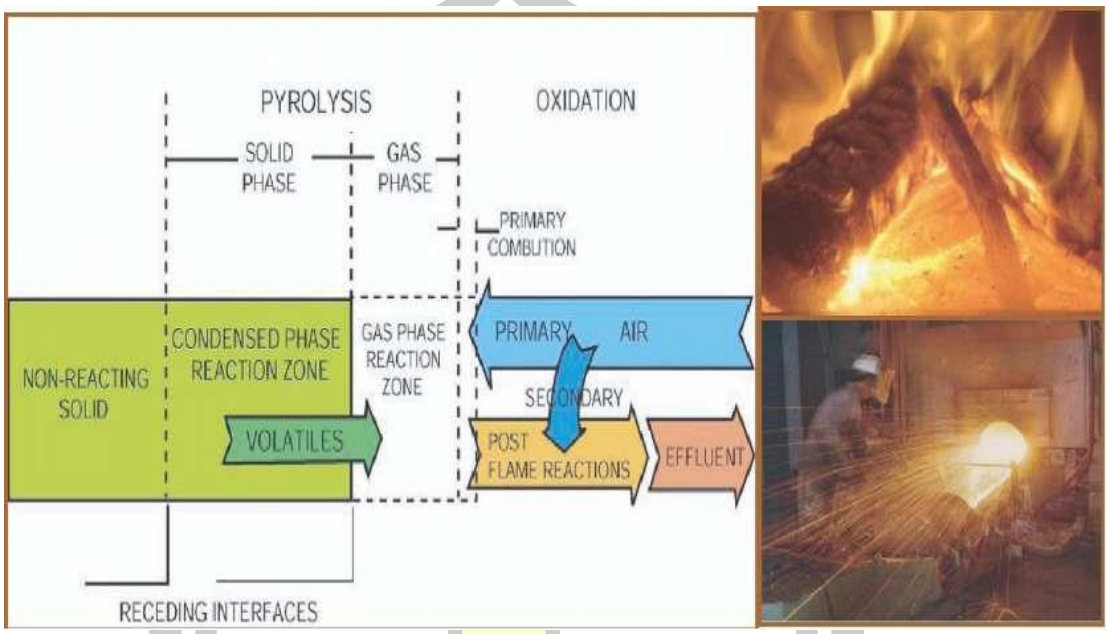


ภาพที่ 5 แสดงเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

2.3.1 การเผาไหม้โดยตรง

ป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการนำเชื้อเพลิงมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการเผาให้ได้ ความร้อนเพื่อเอาก๊าซร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตเช่นการอบแห้งหรือการนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำร้อนที่มีความดันสูงเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้โดยตรงภายในเตาเผาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงไอน้ำที่ผลิตได้นี้จะถูกนำไปใช้ขับกังหันไอน้ำ เพื่อผลิตไฟฟ้าหรือนำความร้อนไปใช้ในกระบวนการสำหรับการใช้ความร้อนสลายโมเลกุลของการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ การใช้ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยเปลี่ยนรูปแบบของเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในเครื่องยนต์ สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) กังหันก๊าซทั้งในวัฏจักรธรรมดาและ Combined Cycle หรือเพื่อใช้ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) การแยกสลายด้วยความร้อนแบบไม่มีออกซิเจน คือ เทคโนโลยีไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชั่น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการออกซิเดชั่นบางส่วนกับออกซิเจน ไอน้ำ หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (C02) ทั้งสองกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน ให้กลายเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ ก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H2) และก๊าซมีเทน (CH4) ก๊าซเหล่านี้จะถูกเผาไหม้เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน



ภาพที่ 6 แสดงการเผาไหม้โดยตรงของชีวมวล

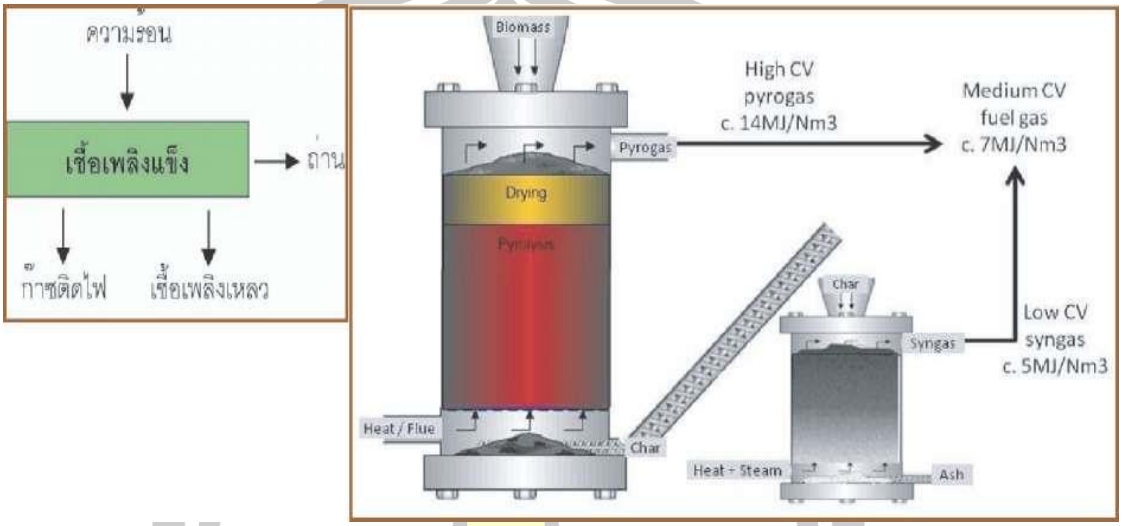
2.3.2 การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical conversion)

เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนมาทำให้โครงสร้างทางเคมีของมวลชีวภาพนั้นแล้วเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นพลังงานตามต้องการ ดังนี้

1. เทคโนโลยีไพโรไลซิส (Pyrolysis) อาศัยกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน เป็นกระบวนการเผาไหม้ชีวมวลโดยใช้ออกซิเจนน้อย ได้ผลิตภัณฑ์คือ ถ่านชาร์ น้ำมันชีวภาพ และก๊าซ ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพและวิธีการให้ความร้อน สำหรับวิธีการให้ความร้อนแบบไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

- **Conventional Pyrolysis** หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Slow Pyrolysis ซึ่งจะทำการไพโรไลซิส โดยอัตราการให้ความร้อนน้อยกว่า 10°C/s และอุณหภูมิที่ใช้น้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันดินและถ่านไม้
- **Flash หรือ Fast pyrolysis** ซึ่งจะให้อัตราความร้อนอยู่ในช่วง 10-10,000°C/s และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400 - 1,000 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือก๊าซและของเหลวเป็นส่วนใหญ่ หากต้องการผลิตภัณฑ์หลักคือ ของเหลวซึ่งอยู่ในรูปของน้ำมัน

จะต้องใช้ปฏิกิริยาไพโรไลซีสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) และหากต้องการผลิตภัณฑ์หลัก คือ ถ่านชาร์ จะใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำ อุณหภูมิปานกลาง และระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยานาน เรียกว่าปฏิกิริยาไพโรไลซีสแบบช้า (Slow Pyrolysis)

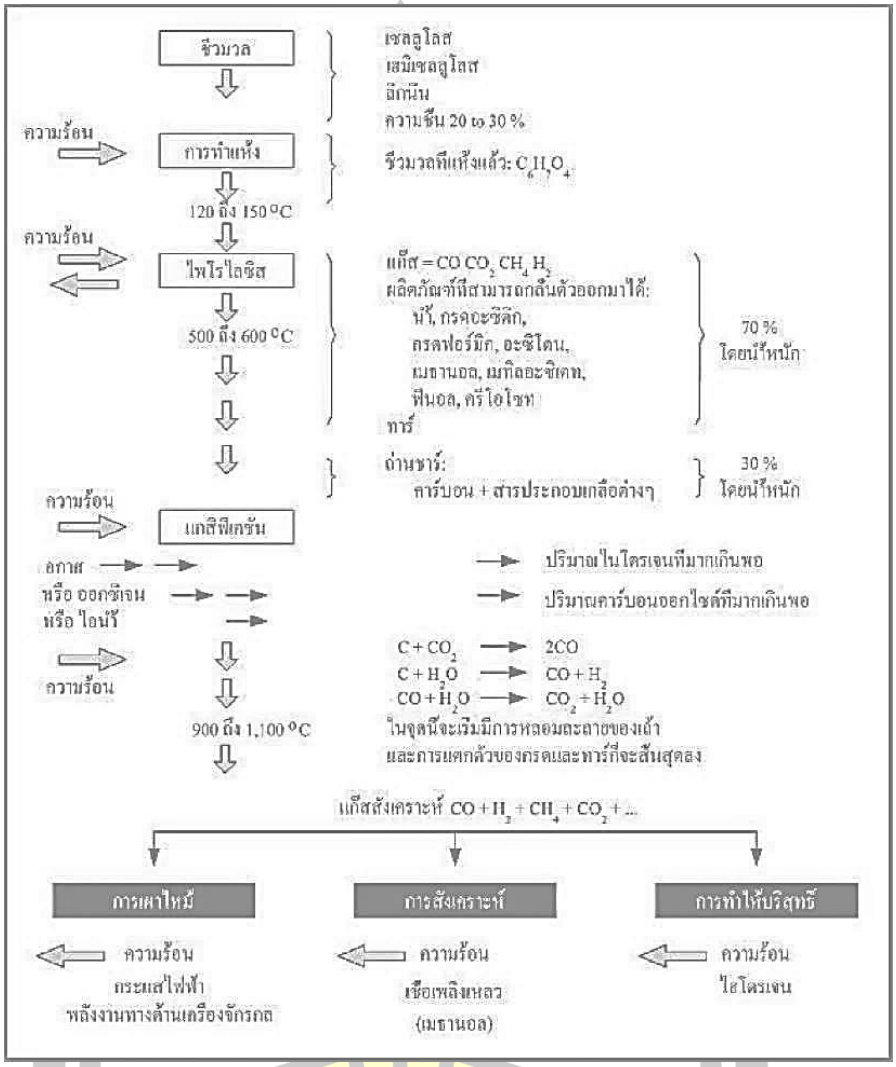


ภาพที่ 7 แสดงกระบวนการ Pyrolysis

กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นนั้นมีความคล้ายคลึงกันมาก เมื่อพิจารณาแล้ว กระบวนการไพโรไลซิสนั้นนับว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดได้เร็ว กว่ากระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่น ขั้นตอนโดยรวมนั้นเริ่มจากการทำให้ชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เอมีเซลูโลส และลีกนิน ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักนั้นปราศจากน้ำโดยอาศัย กระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120-150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมี อุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของ กระบวนการไพโรไลซีสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกก๊าซต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซีติก กรดฟอร์มีกอะซีโตน เมธานอลเมทิลอะซีเตทฟนอล เป็นต้น รวมทั้งพวกทาร์และชาร์ หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไป อีกจนมีอุณหภูมิประมาณ 900 - 1,100 องศาเซลเซียส ประกอบกับมีการเติมตัวออกซิไดส์ให้แก่ระบบจะทำ ให้ทาร์และถ่านชาร์เกิดการแตกตัวได้เป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้นั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการ แก๊สซีฟเคชั่นนั่นเอง กระบวนการไพโรไลซีสและกระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่น ต่างก็มีข้อดีและข้อเสีย แตกต่างกันซึ่งสามารถ สรุปได้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบ ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ประเภท	กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)
ข้อดี	ผลิตภันฑ์ที่ได้ทั้ง 3 ประเภท เป็นเชื้อเพลิงที่มีเกรดสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล	เป็นการนำเชื้อเพลิงราคาถูกมาใช้แทนก๊าซหรือใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้
		เหมาะกับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กไม่เกิน 1 เมกะวัตต์ บริเวณที่มีปริมาณเชื้อเพลิงจำกัด และเหมาะสมกับหมู่บ้านชนบทที่กระแสไฟฟ้าเข้าไม่ถึง
ข้อเสีย	กระบวนการให้ความร้อนโดยตรงยังมีข้อจำกัด และไม่แพร่หลาย	ประสิทธิภาพทางด้านความร้อนของระบบนี้ประมาณ 70%
		เกิดน้ำมันดิน (Tar) ซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ดัดแปลงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า
		ชีวมวลทีเหมาะสมความชื้นไม่ควรเกิน 20%
		ขนาดของชีวมวลต้องมีขนาดใกล้เคียงกันไม่เกิน 10 ซม. หากเล็กเกินไปจะทำให้อากาศไหลผ่านไม่ได้ และหากใหญ่เกินไปจะเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมด
		ขนาดของชีวมวลต้องมีขนาดใกล้เคียงกันไม่เกิน 10 ซม. หากเล็กเกินไปจะทำให้อากาศไหลผ่านไม่ได้ และหากใหญ่เกินไปจะเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมด



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

2.3.3 การใช้ประโยชน์พลังงานจากชีวมวล

การเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้ประโยชน์สามารถเลือกได้หลายแบบดังต่อไปนี้

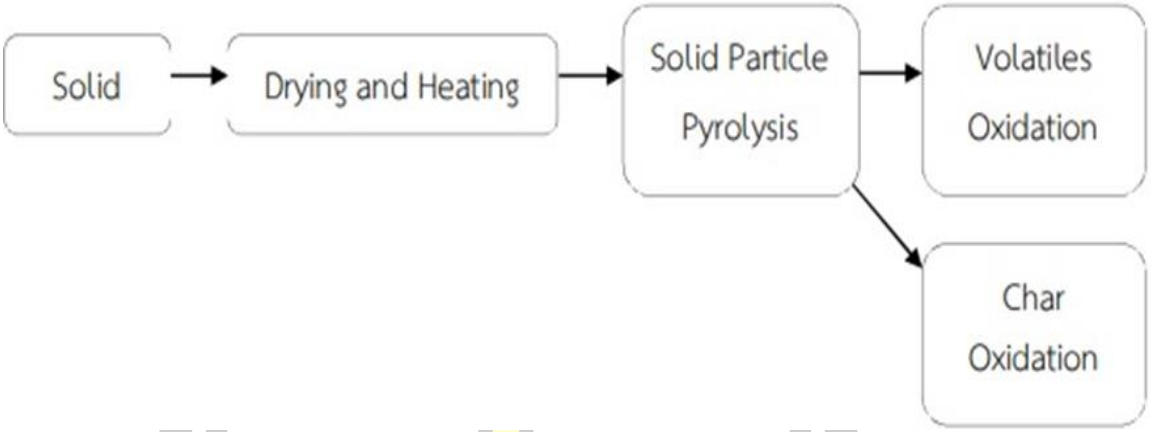
1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) การเผาไหม้โดยตรงเป็นการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของสารอินทรีย์จากชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เช่น การใช้ไม้ฟืนในการหุงต้มทำอาหารในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไม้อัดและกระดาษได้อีกทางหนึ่งด้วย
2. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ประเภทของการไพโรไลซิส สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

a) ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสที่ใช้ความเร็วในการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 400 - 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นของแข็ง (เขม่าดำ ถ่าน) ในปริมาณสูง ให้น้ำมันและก๊าซในปริมาณน้อย
b) ไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสที่ใช้ความเร็วในการให้ความร้อน 10 - 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 600 - 650 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง 25- 30 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซ 15 - 20 เปอร์เซ็นต์
c) ไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (flash pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสที่ใช้ความเร็วในการให้ความร้อนมากกว่า 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นก๊าซ

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงในอุปกรณ์ปิด หรือควบคุมอากาศสำหรับเผาไหม้ให้น้อยลง ซึ่งเป็นผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิงแข็ง เกิดการสลายตัว ทำให้เกิดสารระเหย น้ำมันดิน และถ่านชาร์ เป็นต้น สามารถสรุปเป็นกระบวนการได้ 3 ขั้นตอนคือ การอบแห้ง และการให้ความร้อน การไพโรไลซิสอนุภาคของแข็ง และการออกซิไดซ์ของสารระเหย และการออกซิไดซ์ถ่านชาร์ ซึ่งขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการให้ความร้อน และอบแห้งเป็นการทำให้อนุภาคระเหยน้ำออกด้วยความร้อน จนถึงปฏิกิริยาไพโรไลซ์ ขั้นตอนที่สองเป็นการไพโรไลซ์อนุภาคของแข็ง ให้เกิดการปล่อยสารระเหยที่ไม่เผาไหม้และการสลายตัวของถ่านชาร์สามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 2.1

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการไพโรไลซิส

2.4 หลักการออกแบบเตาหุงต้มที่ใช้ฟืน

หลักการออกแบบเตาหุงต้มของ ดร. ลาร์รี วีเนียร์สกี้ ได้มีการนำมาใช้ในองค์กรต่างๆมากมาย เพื่อสร้างเตาหุงต้มที่ประสบความสำเร็จ เช่น เตาหุงต้ม HELP plancha ในกัวเตมาลา PROLENA Eco stoves ในนิการากัว เตาหุงต้ม Justa ในฮอนดูรัส เตาหุงต้ม Probec ในอัฟริกาใต้ เตาหุงต้มแบบใหม่ของ GTZ ในอัฟริกาและเตาหุงต้มจรวด (Rocket Stoves) เตาหุงต้มเหล่านี้ออกแบบโดยใช้หลักการของ ดร. ลาร์รี วีเนียร์สกี้ โดยจะแบ่งออกเป็น 10 ข้อหลักได้แก่

หลักข้อที่ 1 : เมื่อมีความเป็นไปได้ให้หุ้มฉนวนรอบ ๆ ห้องเผาไหม้ด้วยวัสดุที่มี น้ำหนักเบา วัสดุที่ไม่ดูดซับความร้อน

ถ้าเป็นไปได้อย่าใช้วัสดุที่มีน้ำหนักมาก เช่น ทรายและดินเหนียว ทำเป็นฉนวน ฉนวนควรจะเบาและมีรูพรุน อิฐเบาทนไฟที่สามารถทำได้ในพื้นที่ก็เป็นฉนวนได้ การหุ้มฉนวนโดยรอบทำให้ไฟร้อน ซึ่งจะช่วยลดควันและมลภาวะที่อันตราย ในขณะเดียวกับฉนวนโดยรอบ ทำให้ความร้อนถูกดูดซับไว้ในตัวเตาแทนที่จะให้กับภาชนะ โชคไม่ดีที่โลหะมีอายุการใช้งานที่สั้นเมื่อใกล้ไฟร้อน อย่างไรก็ตาม กระเบื้องเซรามิกที่ทำในพื้นที่มีความคงทนเมื่อใช้เป็นผนังในห้องเผาไหม้

หลักข้อที่ 2 : ใส่ปล่องควันสั้นหุ้มฉนวนเหนือห้องเผาไหม้

ปล่องควันของห้องเผาไหม้จะต้องสูงกว่า 3 เท่าของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง การใส่ปล่องควันสั้นเหนือห้องเผาไหม้ จะช่วยเพิ่มการดูดอากาศและช่วยให้ไฟลุกติดอย่างร้อนแรง ควันจะสัมผัสกับเปลวไฟในปล่องควันและเกิดการเผาไหม้ลดมลภาวะ ภาชนะหรือพื้นผิวที่ต้องการให้ความร้อนวางอยู่เหนือปล่องควันสั้น ปล่องควันในห้องเผาไหม้ที่สูงกว่า 3 เท่าของด้านกว้างจะเผาไหม้ควันได้

มากกว่า แต่ปล่องควันที่สั้นกว่าจะนำแก๊สที่ร้อนกว่าไปสู่ภาชนะ ปล่องควันในห้องเผาไหม้ที่สูงกว่าจะทำให้เกิดการดูดอากาศเย็นมากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง

หลักข้อที่ 3 : ให้ความร้อนและเผาไหม้ปลายไม้เมื่อใส่เข้าไปในห้องเผาไหม้

ถ้ามีเพียงไม้ที่เผาไหม้ร้อนจะมีควันน้อย พยายามที่จะทำให้ไม้ฟืนส่วนที่เหลือเย็น และจะไม่เกิดการคุและควัน วัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้เกิดปริมาณแก๊สที่เหมาะสม ดังนั้นจะเกิดการเผาไหม้ที่สะอาด โดยไม่มีถ่านหรือควัน ควันคือแก๊สที่ไม่ได้เผาไหม้ เป็นอันตรายเมื่อสูดดมเข้าไปถึงแม้ว่าจะมองดูว่าเป็นการเผาไหม้ที่สะอาดแต่ก็ยังมีมลภาวะที่อันตราย

หลักข้อที่ 4 : ความร้อนสูงหรือต่ำเกิดจากปริมาณไม้ฟืนที่ใส่เข้าไป

ปรับปริมาณของแก๊สที่ได้และไฟที่เหมาะต่อการหุงต้ม เมื่อไม้ได้รับความร้อนจะปลดปล่อยแก๊ส แก๊สเกิดการเผาไหม้และให้ความร้อน

หลักข้อที่ 5 : รักษาการดูดอากาศที่ดีและเร็วผ่านทางเชื้อเพลิงที่เผาไหม้

เพียงแค่ลมพัดผ่านไฟและถ่านจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น อัตราการดูดอากาศที่เหมาะสมจะช่วยรักษาอุณหภูมิที่สูงนี้ไว้ได้ในเตาหุงต้ม ไฟที่ร้อนเป็นไฟที่สะอาด

หลักข้อที่ 6 : การดูดอากาศที่น้อยเกินไปจะทำให้เกิดควันและถ่าน

ส่วนเกินอากาศที่มากเกินไปจะทำให้ไฟเย็นและไม่มีประโยชน์ ช่องเปิดที่เล็กกว่าจะช่วยลดอากาศส่วนเกิน การปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนให้กับภาชนะหรือตะแกรง เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดที่จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงในเตาหุงต้ม การปรับปรุงประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะช่วยลดมลภาวะ แต่มีความสำคัญน้อยกว่าเมื่อต้องการประหยัดไม้ฟืน

หลักข้อที่ 7 : ช่องเปิดไฟที่ห้องเผาไหม้

ขนาดของช่องว่างภายในเตาหุงต้มที่ ซึ่งอากาศร้อนไหลและปล่องควัน ควรจะมีขนาดเดียวกันเรียกว่ารักษาพื้นที่ภาคตัดขวางให้คงที่จะช่วยทำให้เกิดการดูดอากาศที่ดีทั่วทั้งเตาหุงต้ม การดูดอากาศที่ดีไม่เพียงแต่ทำให้ไฟร้อน แต่มันมีความสำคัญที่อากาศร้อนที่ได้จะถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพไปให้ภาชนะอากาศนำพาพลังงานความร้อนได้ไม่มาก จึงต้องใช้อากาศเป็นจำนวนมากผ่านเข้าไปในเตาหุงต้มเพื่อให้ความร้อนแก่อาหารและน้ำเป็นไปได้ด้วยดี

หลักข้อที่ 8 : ใส่ตะแกรงใต้ห้องเผาไหม้

อย่านำไม้มาวางที่พื้นของห้องเผาไหม้ อากาศต้องผ่านใต้ไม้ฟืนที่กำลังเผาไหม้ขึ้นไปผ่านถ่านและสู่เปลวไฟ ภายในช่องเปิดของเตาจะต้องยกไม้ฟืนให้สูงขึ้น ดังนั้นอากาศสามารถจะผ่านใต้ไม้ฟืนได้ เมื่อเผากิ่งไม้จะดีที่สุดต้องให้อยู่ใกล้ชิดกันและกระจายอยู่บนชั้น โดยมีช่องอากาศระหว่างกิ่งไม้แต่ละกิ่ง กิ่งไม้ที่เผาไหม้จะให้ไฟที่ร้อนและแต่ละกิ่งไม้จะส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ในกิ่งอื่น ๆ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า มันจะดีที่สุดถ้าอากาศผ่านใต้ชั้นและทะลุผ่าน ดังนั้นเมื่อไปถึงเปลวไฟอากาศก็ได้รับการอุ่นแล้วทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ สำหรับอากาศที่ผ่านด้านบนกิ่งไหม้ จะไม่มีประโยชน์เนื่องจากเป็นอากาศที่เย็นกว่าจะไปทำให้ไฟเย็นตัวลงไฟที่ร้อนจะสะอาดส่วนไฟที่เย็นจะสกปรกกว่า

หลักข้อที่ 9 : หุ้มฉนวน ส่วนที่ความร้อนไหลผ่าน

เตาหุงต้มที่ต้มน้ำเดือดได้เร็วเป็นสิ่งที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในตอนเช้าเมื่อสมาชิกของครอบครัวต้องไปทำงาน ถ้าความร้อนถูกตัวเตาดูดกลืนไว้ การหุงต้มก็จะช้า เมื่อต้องการต้มอาหาร 1 kg หรือน้ำ 1 ลิตร ต้องใช้เวลานาน การใช้วัสดุหุ้มฉนวนภายในเตาหุงต้มจะทำให้แก๊สร้อนไม่ถูกดูดความร้อนไป แก๊สร้อนจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนให้ผนังและตะแกรงได้ดีกว่า และฉนวนต้องมีช่องอากาศและน้ำหนักเบา ดินเหนี่ยวและทรายหรือวัสดุหนักชนิดอื่นๆไม่ใช่ฉนวน วัสดุมวลหนักจะดูดกลืนความร้อนและทำให้เหลือความร้อนไปสู่อาหารน้อยลง

หลักข้อที่ 10 : การถ่ายเทความร้อนสู่ภาชนะสูงสุดด้วยขนาดช่องที่เหมาะสม

การทำให้ความร้อนถ่ายเทสู่ภาชนะและตะแกรงที่ดีที่สุดด้วยช่องแคบๆ แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกบังคับให้ไหลผ่านช่องแคบๆ เหล่านี้ เพื่อที่จะสัมผัสกับภาชนะหรือตะแกรง ถ้าช่องแคบๆ กว้างเกินไป แก๊สร้อนจะอยู่ตรงกลางและไม่ส่งผ่านความร้อนให้พื้นผิวที่ต้องการหุงต้ม แต่ถ้าช่องแคบๆ เล็กเกินไปจะไม่เกิดการดูดอากาศ ทำให้แก๊สร้อนเย็นตัวลง มลภาวะก็จะมีมากขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทให้ภาชนะก็มีน้อยลง เมื่อทำการออกแบบเตาหุงต้มถ้าเป็นไปได้ควรจะลดขนาดของช่องแคบให้แคบลงจนกระทั่งเกิดการเฉื่อยชา โดยใช้การลองผิดลองถูก แล้วค่อยๆ เปิดช่องที่ละนิดที่ละหน่อยจนกระทั่งไฟร้อนและแรง

2.5 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นวัสดุที่ได้จากการเกษตรเช่น แกลบ ซังข้าวโพด เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้สามารถหาได้ง่ายในบริเวณพื้นที่ ที่มีการทำเกษตรกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1) ชื้อเพลิงที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ได้แก่เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้ และขี้เลื่อย เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 40
2) เชื้อเพลิงที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ได้แก่ แกลบข้าว ซังข้าวโพด เชื้อเพลิง ประเภทนี้จะมีปริมาณลิกนินค่าประมาณร้อยละ 0-20
3) ชื้อเพลิงที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial wastes) ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือซานอ้อย กากสับปะรด ซึ่งเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีความชื้นสูงมาก
4) เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic Wastes) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะที่ทิ้งจากเทศบาล

2.5.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นกระบวนการซึ่งทำให้เกิดพลังงานความร้อนในเตาหุงต้ม เพื่อการหุงต้มอาหารสำหรับบริโภคในชีวิตประจำวัน ผู้ออกแบบเตาหุงต้มที่ประสบความสำเร็จจะต้องเข้าใจรายละเอียดของกระบวนการนี้เป็นอย่างดี ดังนั้นนอกจากความเข้าใจเกี่ยวกับการเผาไหม้ในรูปของคุณสมบัติต่างๆทางเทอร์โมไดนามิคส์แล้ว ยังจะต้องเข้าใจถึงความเป็นจริงทางฟิสิกส์และเคมีที่เกี่ยวข้องกับการผาไหม้ ความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับฟิสิกส์และเคมีของการเผาไหม้มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาและออกแบบเตาหุงต้มที่เผาไหม้สะอาด

จุดเริ่มต้นของการศึกษาการเผาไหม้คือการอธิบายที่กระจ่างชัดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของเชื้อเพลิง โดยที่มนุษย์รู้จักไฟมานานไม่ต่ำกว่า 600,000 ปีในรูปแบบตามธรรมชาติ ดังนั้นชุมชนต่างๆจึงมีเรื่องราวที่เกี่ยวกับการค้นพบไฟในรูปแบบต่างๆกันไป มนุษย์เริ่มรู้จักการจุดไฟได้เองเมื่อประมาณ 30,000 ปี ทำให้มนุษย์สามารถจุดไฟได้ตามความต้องการ นับจากนั้นเป็นต้นมามนุษย์ก็ใช้ไฟในการหุงต้ม ให้แสงสว่าง ให้ความร้อน นำมาทำโลหะและใช้เป็นแรงกลน้อยๆ ทฤษฎีการเผาไหม้สมัยใหม่ เริ่มจากงานของ Mallard and Le Chatelion (1883) เมื่อร้อยกว่าปีมาแล้ว ถึงแม้ว่าทฤษฎีการเผาไหม้จะมีประวัติมาอย่างยาวนานก็ตาม แต่การเผาไหม้ก็มีความเข้าใจที่ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะการเผาไหม้ที่ย้อนกลับไปถึงตอนที่มนุษย์ค้นพบวิธีการจุดติดไฟ จุดนี้เองที่ทำให้เกิดความสนใจ ในการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ขึ้นอย่างจริงจังในช่วง 30 ปีที่ผ่านมานี้เอง

สำหรับกระบวนการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) กระบวนการ ไพโรลีซีส เมื่อไม้ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวในกระบวนการไพโรลีซีส ทำให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเปลี่ยนรูปไปเป็นสารระเหย (Volatiles) ระเหยออกมาและมีถ่านเกิดขึ้นเป็นส่วนที่เหลือ
2) การเผาไหม้จะเกิดขึ้นกับสารระเหยที่ได้จากกระบนการพโรลีซีสก่อน ทำให้มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา ซึ่งสารระเหยหลักในการเผาไหม้คือ ทาร์หรือน้ำมันดิน
3) การเผาไหม้ถ่านจะเกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้สารระเหยแล้ว ซึ่งการเผาไหม้ถ่านจะใช้เวลานานกว่าการเผาไหม้สารระเหย

โดยปกติแล้วในกระบวนการการเผาไหม้ จะใช้ไม้ที่มีขนาดใหญ่ ประมาณขนาดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 7 ซม.และยาว 50 - 70 ซม.

2.5.2 ไพโรลีซีสของไม้

เมื่อไม้ได้รับความร้อนในบรรยากาศที่เฉื่อย น้ำที่อยู่ภายในเนื้อไม้จะเกิดการเดือดและหนีออกจากไม้ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 110 °C ปรากฏการณ์การปลดปล่อยนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆกันทั่วทั้งท่อนไม้ ความชื้นบางส่วนทะลุผ่านผิวของไม้ออกมาและหนีหายไปในสิ่งแวดล้อม แต่ความชื้นบางส่วนกลับเข้าไปภายในเนื้อไม้ส่วนที่เย็นกว่าและเกิดการกลั่นตัว ดังนั้นในระหว่างการเผาไหม้ ไม้ที่หนาจะมีความชื้นสูงกว่าเดิม ก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้เสียอีก

เมื่อไม้ได้รับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น การสลายตัวทางเคมีก็เกิดขึ้นโดยที่เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวก่อนระหว่างอุณหภูมิ 200 - 260 °C ส่วนเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวต่อมาที่อุณหภูมิ 240 - 370 °C สำหรับลิกนินจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 280 °C หรือมากกว่า กระบวนการไพโรลีซีสจะเกิดความสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่สูงกว่า อัตราความร้อนที่เร็วกว่าและขนาดของวัสดุที่เล็กกว่าจะทำให้เกิดกระบวนการ gasification และเกิดการเผาไหม้ที่มีเปลวไฟอย่างราดเร็ว ในอีกด้านหนึ่ง อุณหภูมิที่ต่ำกว่าขนาดวัสดุที่ใหญ่กว่า มีความชื้นและสารอินทรีย์ จะเกิดปริมาณถ่านมากกว่า ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่คุแดง (blowing combustion)

การศึกษาการเผาไหม้ ถือว่าไม่สมบูรณ์ ถ้าไม่อ้างถึงข้อมูลทางเคมีจลน์ที่เหมาะสม ปัญหามีความซับซ้อนไม่เพียงแต่มีองค์ประกอบทางเคมีเกิดขึ้นมากมายในสารระเหย (Volatiles) แต่ยังเกี่ยวเนื่องกับความไวของปฏิกิริยาที่มีต่อเงื่อนไขทางกายภาพ รวมทั้งที่ๆเกิดปฏิกิริยาและการมีอยู่ของสารปนเปื้อนอีกด้วย

องค์ประกอบที่ 3 ที่มีความสำคัญในการพัฒนาทฤษฎีที่สมบูรณ์ สำหรับการเผาไหม้ไม้คือความร้อนจากปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรลีซีส โดยทั่วไปกระบวนการดูดความร้อนจะเกิดขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 250 °C และจากอุณหภูมิ 250 – 300 °C จะพบว่าเกิดทั้งการดูดความร้อนและการคายความร้อนพร้อมๆกันและตามด้วยการคายความร้อน

สำหรับรายละเอียดการศึกษา กระบวนการไพโรลีซีสรวมทั้งเอกสารอ้างอิงเพิ่มเติมหาได้จาก Browne (1958) Murty Kanury & Blackshear (1970) และ Pyle (1977)

2.5.3 การเผาไหม้สารระเหย

สารระเหยที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซีสมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่สารระเหยส่วนใหญ่จะเป็นทาร์ ซึ่งทาร์สามารถจุดติดไฟได้ การเผาไหม้สารระเหยจึงเป็นการเผาไหม้ทาร์ นอกจากทาร์แล้วยังมีน้ำส้มควันไม้หรือน้ำส้มไม้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งการเผาไหม้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นอกจากจะเป็นการนำเชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์แล้ว ยังเป็นการกำจัดแก๊สพิษอีกด้วย

2.5.4 การเผาไหม้ถ่าน

การพูดถึงการเผาไหม้ถ่านในที่นี้สมมุติว่าถ่านประกอบด้วยคาร์บอนเกือบทั้งหมดและขี้ถ้า งานที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้เป็นของ Thing (1965) เป็นการกล่าวถึงการประยุกต์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้ของคาร์บอนโดยออกซิเจนในเชื้อเพลิงแข็งที่อยู่บนฐาน (on bed) โดยพิจารณาได้ว่ามี 3 ขั้นตอนคือ

1) **Heterogeneous combustion** ในขั้นตอนนี้ออกซิเจนในอากาศวิ่งผ่านช่องอากาศที่ฐานเชื้อเพลิงแล้วเกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็งตรงผิวของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$2C+02 \longrightarrow 2C0$$

2) **Homogeneous combustion** คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ได้จากขั้นตอนแรกผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเชื้อเพลิงและเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้ได้ปฏิกิริยาดังนี้

$$2C0+02 \longrightarrow 2C02$$

3) **Heterogeneous reduction** คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ที่ได้จากกระบวนการ Homogeneous combustion จะเกิดปฏิกิริยา Heterogeneous reduction กับคาร์บอนที่ผิวของเชื้อเพลิงทำให้เกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$C02+ C \longrightarrow 2C0$$

การเผาไหม้ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมากสามารถเกิดขึ้นใต้ในระหว่างการเผาไหม้สารระเหย โดยชนิดแรกจะเกิดเป็นเปลวไฟ ก่นที่จะผสมกัน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่เกิดขึ้นในเตาแก๊ส LPG ภายในครัวเรือนปกติธรรมดา ส่วนชนิดที่สองเรียกว่าเปลวไฟที่เกิดจากการแพร่ ซึ่งลำของเชื้อเพลิง (สารระเหย) เกิดการเผาไหม้กับอากาศที่มาจากสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่รอบๆ

สารเคมีที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้อย่างแรงกล้านี้มีความสลับซับซ้อนมาก มีองค์ประกอบทางเคมีมากกว่า 200 องค์ประกอบที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซีส ดังนั้นการศึกษาการเผาไหม้ของไม้จึงละเว้นเรื่องขององค์ประกอบทางเคมีไว้และสนใจเฉพาะ Aerodynamic ของการเผาไหม้เท่านั้น โดยเมื่อขึ้นไม้เกิดการเผาไหม้ กระบวนการทั้ง 3 จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน

2.5.5 การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ

หนึ่งในองค์ประกอบที่ใช้ในการตรวจวัด การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟคืออัตราการปลดปล่อยการแผ่รังสี โดยผลรวมทั้งหมดของอัตราการปลดปล่อยการแผ่รังสีของเปลวไฟ เป็นผลจากการรวมตัวของอนุภาคเขม่าและแก๊ส

2.5.6 การปลดปล่อยจากอนุภาคเขม่า (Emission of the soot particles)

การปลดปล่อยอนุภาคเขม่าขึ้นอยู่กับ 2 ปริมาณคือความสูงของเปลวไฟและสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคเขม่าในเปลวไฟ จากการทดลองปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยของเขม่าที่อยู่บนภาชนะมีค่าประมาณ 5 กรัม จากการเผาไหม้ไม้ 1 kg และที่องค์ประกอบปริมาณอากาศส่วนเกินที่ 3 จะพบ ว่าสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคเขม่าอยู่ที่ 2.1 X 10' ซึ่งคำนี้สมเหตุสมผลดีกับการทดลองในเตาหุงต้มแบบเตาอิฐ ซึ่งมีความเข้มข้นของเขม่าระหว่าง 5- 10 mg/m' ของผลผลิตของการเผาไหม้ที่ได้

2.5.7 การปลดปล่อยแก๊ส (Emission of the gases)

แก๊สโดยปกติที่มีอยู่มีเพียงสองชนิดคือ CO, และ H. 0 ที่เป็นองค์ประกอบของการปลดปล่อย สำหรับแก๊สอื่นๆ (O, และ N) ประกอบด้วยโมเลกุลที่สมมาตรกัน ที่จะปลดปล่อยและดูดกลืนรังสีเฉพาะที่อุณหภูมิสูงกว่า ในส่วนของการประมาณ การปลดปล่อยแก๊ส CO, และ H,0 เราจะสมมุติว่าไม่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นและองค์ประกอบอากาศส่วนเกินเท่ากับ 2 จากการคำนวณเราสมมติให้ปริมาตรอ้างอิงเป็นวงกลมทรงกระบอก

ในงานวิจัยฉบับนี้มุ้งเน้นไปที่การใช้งานไผ่มาใช้เป็นวัสดุในการผลิตเป็นถ่าน โดยถ่านที่ใช้ไผ่มาทำมีความแตกต่างจากถ่านทั่วไปดังหัวข้อต่อไปนี้

2.6 ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากมวลชีวภาพ (Biomass) ผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยจำกัดอากาศหรือไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศในช่วงอุณหภูมิสูง 500-800 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ (แก๊สคาร์บอนไดออกไซค์ คาร์บอนมอนนอกไซค์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน และอื่นๆ) ของเหลว (สารละลายอินทรีย์ และน้ำมันดิน (Tar) และของแข็ง (ถ่าน) โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ และสารประกอบในผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และวิธีการไพโรไลซิส

ประโยชน์และการนำถ่านชีวภาพมาใช้ประโยชน์

การเลือกใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายไม่เฉพาะการใช้ในรูปแบบของเชื้อเพลิงแข็ง แต่ยังสามารถใช้ประโยชน์ในด้านการกักเก็บคาร์บอนในดิน และปรับปรุงดิน ทั้งนี้เพราะการกักเก็บคาร์บอนในดิน ด้วยถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายมวลชีวภาพด้วยความร้อนจะสามารถเก็บคาร์บอนได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่มีอยู่ในมวลชีวภาพ ขณะที่คาร์บอนที่ได้จากการเผามวลชีวภาพจะเหลือเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ และจากการย่อยสลายโดยธรรมชาติหลังจาก 5-10 ปี จะได้คาร์บอนน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของคาร์บอนที่ได้จะขึ้นกับชนิดของมวลชีวภาพ สำหรับอุณหภูมิจะมีผลน้อยมากถ้าอยู่ระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส นอกจากเหตุผลดังกล่าวยังสามารถสรุปการนำถ่านชีวภาพไปใช้ให้เกิดประโยชน์ดังนี้

1. ช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศเนื่องจากถ่านชีวภาพ สามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ในระยะยาวได้ด้วยการกักเก็บคาร์บอนในดิน
2. ช่วยปรับปรุงดิน และผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเมื่อนำถ่านชีวภาพลงดิน ลักษณะความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำและอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์ สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น

3. ช่วยผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากมวลชีวภาพด้วยการแยกสลายด้วยความร้อนจะให้พลังงานชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทน เพื่อการขนส่ง และในระบบอุตสาหกรรมได้
4. ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากเทคโนโลยีไบโอชาร์มีศักยภาพในการกำจัดของเสียที่ทำให้สิ่งแวดล้อมเสียหายได้

2.6.1 ถ่านไม้ไผ่ (Bamboo Charcoal)

ถ่านไม้ไผ่ หรือ Bamboo Charcoal คือถ่านที่ได้จากการเผาไหม้ไม้ไผ่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส มีรูปทรางของไม้ไผ่ชัดเจน ผิวของถ่านมีความเงาเล็กน้อย หากเคาะกับพื้นแข็งจะมีเสียงดังกังวานเหมือนโลหะเนื่องจากมีความบริสุทธิ์ของธาตุคาร์บอน โดยคุณลักษณะของถ่านไม้ไผ่ที่แตกต่างจากถ่านอื่น ๆ แสดงดังต่อไปนี้

1. มีรูพรุนมากกว่า หากนำมาแผ่กระจายออกเป็นพื้นที่จะได้พื้นที่มากถึง 300 ถึง 700 ตร.ม/กรัม (ถ่านไม่ทั่วไป จะได้พื้นที่ประมาณ 50 ตร.ม/กรัม)
2. มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (ไม่เกิด 100 โอห์ม)
3. มีแร่ธาตุต่าง ๆ มากมาย เช่น แคลเซียม โปแตสเซียม โซเดียม และธาตุเหล็ก เป็นต้น
4. สำหรับถ่านที่ผ่านการเผาในความร้อนสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะปล่อยรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวที่ให้ความอบอุ่นและประจุลบ ที่สามารถเปลี่ยนอนุมูลอิสระให้เป็นออกซิเจน ซึ่งคุณสมบัตินั้นจะถูกนำมาพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์ขับพิษสารตกค้างในร่างกายได้ ถ่านไม้ไผ่ยังสามารถดูดซับคลื่นอิเล็กทรอแม็กเนติกได้อีกด้วย

2.6.1 การใช้ประโยชน์จากถ่านไม้ไผ่

ถ่านไม้ไผ่ถูกนำมาใช้ทั้งในด้านการเกษตร การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรม และชีวิตประจำวัน ซึ่งสามารถแยกการใช้ประโยชน์ จากถ่านไม้ไผ่ได้ดังนี้

1. การใช้ประโยชน์จากถ่านไม้ไผ่ด้านเกษตร
   - ใช้ผสมอาหารสัตว์ ช่วยเพิ่มแร่ธาตุ ดูดซับสารพิษ กำจัดแบคทีเรียในทางเดินอาหาร ลดกลิ่นเหม็นจากมูลสัตว์
   - ใช้ผสมดินเพื่อการเพาะปลูก ช่วยปรับสภาพดิน เพิ่มแร่งธาตุที่พืชต้องการ

2. การใช้ประโยชจากถ่านไม้ไผ่ทางด้านการแพทย์ ถ่านไม้ไผ่จะถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการทำห้องบำบัดสุขภาพ ซึ่งจะช่วยฟอกอากาศ ดูดกลิ่น ความชื้น ปลดปล่อยประจุลบ และอินฟาเรดยาว ซึ่งมีคุณประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยประจุลบ สามารถเป็นอนุมูลอิสระเป็นออกซิเจน ถ้าหากเกิดปฏิกิริยานี้ในร่างกายของเรา จะทำให้ออกซิเจนในร่ายการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมองปรอดโปร่ง
3. การใช้ประโยชน์จากถ่านไม้ไผ่ด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยถ่านไม้ไผ่จะช่วยดูดซับและหักเหคลื่นไฟฟ้า ที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
4. การใช้ประโยชน์จากถ่านไม้ไผ่ด้านอุตสาหกรรม โดยถ่านไม้ไผ่เป็นส่วยผสมในอุตสาหกรรมสุขภาพมากมาย เช่น สบู่ แชมพู ยาสีฟัน ถ่านเม็ดดูดสารพิษ เป็นต้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาถึงการพัฒนาเตาที่สามารถนำเอาชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ในครัวเรือน มีการศึกษาในรูปแบบที่หลากหลายและต่อเนื่อง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไปนี้

MacCarty et al, 2010 ได้ดำเนินโครงการเพิ่มประสิทธิภาพเตาที่ใช้ในครัวเรือน โดยมีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องต่อการลดการทำลายป่าไม้ ลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้และเป็นส่วนหนึ่งของการลดปัญหาสภาวะโลกร้อนร่วมด้วย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีการรวบรวมเตาเผาชีวมวลที่มีการออกแบบและใช้งานจริง มาทำงานทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ทำการทดสอบเตารวมทั้งสิ้น 50 ชนิด โดยวิธีการทดสอบ และผลการทดสอบที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบได้แก่ การทดสอบ Water Boiling Test (WBT) เพื่อทดสอบเปรียบเทียบปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาแต่ละประเภท การตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และฝุ่นเพื่อศึกษาถึงมลพิษที่เกิดขึ้นขณะใช้งานเตา เตาทั้ง 50 ประเภท ถูกจัดแบ่งสำหรับการทดสอบใน 7 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ เตาแบบธรรมดาที่ไม่มีช่องการเผาไหม้ เตาที่มีช่องการเผาไหม้แบบ Rocket Type เตา Gasifier เตาที่ต้องอาศัยพัดลมช่วยในการไหลอากาศ เตาเผาถ่าน เตาที่ใช้ในการผลิตแก๊สและเชื้อเพลิงเหลว และเตาเผาไม้ซึ่งมีปล่องควัน ผลการศึกษาในเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่า

- เตาแบบธรรมดาที่ไม่มีช่องการเผาไหม้ (Simple stoves without combustion chambers) ซึ่งเป็นเตาที่ไม่มีการออกแบบช่องการเผาไหม้จะลดการใช้สูญเสียปริมาณ

เชื้อเพลิงได้มากกว่าเตาทั่วไปในรูปแบบเตาสามขาแต่ยังมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์และฝุ่นในปริมาณเท่าๆ กัน

- เตาแบบ Rocket-type สามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลงได้ 33% ลดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ 75% และลดฝุ่นได้ 46% เมื่อเทียบกับเตาสามขา
- การใช้ที่บังลมระหว่างตัวหม้อกับเตาลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ 25 – 30%
- เตาแบบ Gasifier ที่มีการควบคุมสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสามารถลดปัญหาเรื่องฝุ่นได้กว่า 90% เมื่อเทียบกับเตาแบบสามขา
- เตาที่อาศัยพัดลมช่วยในการไหลของอากาศในเตาลดการใช้เชื้อเพลิงได้ประมาณ 40% ลด emission ได้ 90%
- สำหรับเตาที่ใช้สำหรับการผลิตถ่านทั่วไปมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเท่าๆ กับเตาแบบสามขา มีการปลดปลอดคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 2 เท่า แต่มีปริมาณฝุ่นน้อยกว่าประมาณ 80% แต่การผลิตถ่านโดยอาศัย Rocket-type จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงลงและยังสามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ประมาณครึ่งหนึ่งของเตาเผาถ่านธรรมดา
- เตาผลิตแก๊สและเชื้อเพลิงเหลว จะใช้เชื้อเพลิงน้อยและมีปริมาณมลพิษน้อย สำหรับเตาที่ใช้ในการผลิต Kerosene มักก่อให้เกิดปัญหาเรื่องฝุ่นมากกว่าเตาเผาไม้บางประเภท
- เตาเผาที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว (Well-designed Stove) สามารถลดปริมาณควันขณะจุดติด เชื้อเพลิงที่ใช้สามารถให้ความร้อนได้โดยตรงต่อภาชนะสำหรับการหุงต้ม ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางของการพัฒนาเตาในรูปแบบที่เหมาะสม ตามความต้องการได้ในอนาคต

Vitali et al, 2013 ได้ทำการศึกษาเตาต้นแบบ ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นเตาทั่วไปที่มีตาข่ายเหล็กที่รองรับเชื้อเพลิง ซึ่งจะผ่านการเผาไหม้โดยอาศัยการไหลของอากาศแบบธรรมชาติ มีการออกแบบชั้นบรรจุแกลบภายในเตา และทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เตาแกลบทดแทนการใช้เตาฟืน จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ซึ่งอาศัยผลการศึกษาจากผลการทดสอบ ประสิทธิภาพเตาด้วยการทดสอบแบบ WBT ควบคู่ไปกับการศึกษาผลด้านเศรษฐศาสตร์เปรียบเทียบ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เตาแกลบที่ทำการออกแบบสามารถใช้ทดแทนความต้องการทางด้านพลังงานความร้อนในครัวเรือนได้ประมาณ 10 – 15% หรือคิดเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่าย ด้านการใช้เชื้อเพลิงในการ

ประกอบอาหารได้มากกว่า 50% และโมเดลในการทำนายดังกล่าวยัง สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบเตาประเภทอื่นได้ด้วย

กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ, 2554 ได้ศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากสาหร่าย ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบช้าในช่วงอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 550 องศาเซลเซียส กับเตาปฏิกรณ์แบบเบด ผลการศึกษาพบว่าสามารถผลิตถ่านชีวภาพให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพที่ได้จากชีวมวลกลุ่มอื่น ในช่วงอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเดียวกัน และผลการศึกษาเปรียบเทียบพบว่าองค์ประกอบของคาร์บอนในถ่านชีวภาพที่ได้จากสาหร่ายเทาจะให้ค่ามากที่สด คือ 59.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากสาหร่าย Spieulina และสาหร่ายไก ตามลำดับ นอกจากนั้นถ่านชีวภาพที่ได้ยังมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่เหมาะสม สำหรับใช้ในรูปแบบพลังงานใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงแข็งจากฟอสซิล และถ่านจากไม้โอ๊กอีกด้วย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงการนำชีวมวลที่หาได้ง่ายตามท้องถิ่นมาใช้เป็นพลังงานความร้อน ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น และไพโรไลซิส รวมไปถึงลักษณะการใช้งานที่ถูกต้อง และการคิดค้นเตาแก๊สซิไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้ในครัวเรือนเพื่อทดแทนการใช้แก๊ส LPG

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาและคัดเลือกเตาสำหรับทดสอบ

การศึกษาและคัดเลือกเตาหุงต้มชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ระดับครัวเรือน ขนาด 50 ลิตร (The 50-liter household biomass gasifier stove, 50L-HBGS) โดยพิจารณาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลการผลิตเตาหุงต้มชีวมวลระดับครัวเรือนที่สามารถเผาถ่านชีวภาพไปพร้อมกันได้ ซึ่งมีการจัดสร้างและมีการนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง ทำการคัดเลือกเตาสำหรับนำมาใช้ในการทดสอบที่มีลักษณะของการให้ความร้อน หรือการจุดติดที่แตกต่างกัน โดยทำการคัดเลือกเตาทดสอบที่มีความเหมาะสมในการนำมาทดสอบและพัฒนาเป็นเตาต้นแบบ ทั้งนี้เตา 50L-HBGS ที่ค้นพบในตลาดและเครือข่ายพลังงานชุมชนที่มีการผลิตและใช้งานจริง ได้แก่

3.1.1 เตาเบ็บซี (BEBC Stove)

เตาเบ็บซี (BEBC Stove) เป็นเตา 50L-HBGS ที่ผลิตและใช้งานจริง เป็นเตาพลังงานชีวมวลผลิตแก๊สหุงต้มและไบโอชาร์ระดับครัวเรือน เคลื่อนย้ายสะดวก ให้พลังงานความร้อนสูง โดยใช้เชื้อเพลิงน้อย เหมาะสำหรับการหุงต้มประกอบอาหารในชีวิตประจำวัน ส่วนประกอบหลักของเตา คือ ถังเหล็กขนาดความจุ 50 ลิตร เจาะตรงกลางฝาถังและก้นถังขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. พับขอบที่ตัดส่วนฝาถังลงด้านล่าง ส่วนขอบก้นถังพับขึ้นด้านบนสำหรับเป็นตัวล็อคท่อกลวงที่จะมาสวม ถ้าปิดฝาถังแล้วจะเห็นถังมีช่องกลวงตรงกลาง เหมือนรูปโดนัท ใช้แผ่นเหล็กอย่างบางหรือสังกะสีอย่างหนาทำเป็นท่อกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับช่องที่เจาะฝาและก้นถังไว้ (ดังรูปที่ 3.1) ขนาดความสูงเท่ากับความสูงถัง เจาะรูเป็นแนวโดยรอบท่อกลวงประมาณ 2-3 แนว สำหรับให้แก๊สคายออกจากถังเข้าสู่ท่อกลวงได้ เมื่อสวมท่อกลวงลงในถังเรียบร้อยแล้ว นำถังไปตั้งบนอิฐบล็อกเพื่อให้อากาศเข้าจากส่วนก้นถัง บนอิฐบล็อคมีตะแกรงเหล็กวางกันเศษกิ่งไม้ร่วง ส่วนที่เป็นโดนัทใส่มวลชีวภาพ เช่น เศษกิ่งไม้แห้ง หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ฟางข้าว กะลามะพร้าว ซังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ฯลฯ จนเต็มแล้วปิดฝาไม่ให้อากาศเข้า ส่วนช่องท่อกลวงตรงกลางถังใส่เศษกิ่งไม้แห้งเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ควรเกิน 1 นิ้ว ใส่พอให้อากาศผ่านจากก้นท่อขึ้นมาได้ เหลือที่ส่วนบนไว้ประมาณ 10 เซนติเมตร ใส่กิ่งไม้ขนาดเล็กมากจนพอดีฝาถัง จุดไฟบนกิ่งไม้เล็กๆจนติดไฟ ประมาณ 5 นาที ไม้ส่วนล่างได้รับความร้อนจะคายแก๊สออกมาก่อนที่ตัวมันเองจะถูกไหม้ ถ้ากิ่งไม้ที่นำมาใส่ใน

ท่อกลวงแห้งมากๆจะมีแก๊สเกิดเร็วและไม่มีควัน เมื่อความร้อนที่เกิดในท่อกลวงมีการสะสมมากขึ้น จะถ่ายเทความร้อนสู่ชีวมวลในเตา จนความร้อนถึง 350 องศาเซลเซียส ชีวมวลในเตาจะคายแก๊สออกมาผ่านรูท่อกลวงตรงกลางถัง จะทำให้เกิดแก๊สลุกไหม้อย่างต่อเนื่องประมาณ 45 นาที เมื่อแก๊สหมด ทิ้งให้เตาเย็นแล้วจึงเปิดฝาถัง จะได้ถ่านสำหรับนำไปผสมกับปุ๋ยคอกปรับปรุงดินได้ ถ่านที่นำไปลงดินนี้เรียกว่าไบโอชาร์ (Biochar) หรือถ่านชีวภาพนั่นเอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 9 เตาเบ็บซี ก) ลักษณะการใช้งานและถ่านชีวภาพจากเตา ข) แกนเตาและสภาพภายในเตา (ที่มา: https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=20127)

3.1.2 เตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้

เป็นเตา 50L-HBGS พัฒนาต่อยอดมาจากเตาเบ็บซี (BEBC) โดยพยายามแก้ไขปัญหาการคลายแก๊ซของชีวมวลที่อยู่ในเตาช้า แกนเตามีอายุการใช้งานสั้น และการมีชีวมวลบริเวณด้านล่างในเตาที่กลายเป็นถ่านไม่หมด ด้วยการใส่ฉนวนเซรามิคไฟเบอร์หนา 6 มิลลิเมตร และหุ้มด้วยเมทัลชีทแผ่นเรียบ (ดังรูปที่ 3.2) และปรับแกนเตาให้เป็นเหล็กท่อกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 1.8 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 8 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู เป็นแนวโดยรอบแกนเตาด้านล่างเพียงแนวเดียว ผลทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ควันน้อยลง ชีวมวลในเตาคลายแก๊สเร็วขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการเผาถ่านชีวภาพสั้นลง แต่ก็ยังมีบางครั้งที่กระบวนการเผาไหม้ขาดความต่อเนื่อง และมีชีวมวลบางส่วนบริเวณด้านล่างในเตากลายเป็นถ่านไม่หมด

จากการพิจารณาแล้ว ผู้วิจัยจึงเลือกเตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้เป็นเตาทดสอบที่จะใช้การศึกษาวิจัย และพัฒนาต่อยอดให้เกิดเตาต้นแบบ ที่แก้ไขปัญหาจุดอ่อนต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น

(ก) (ข)

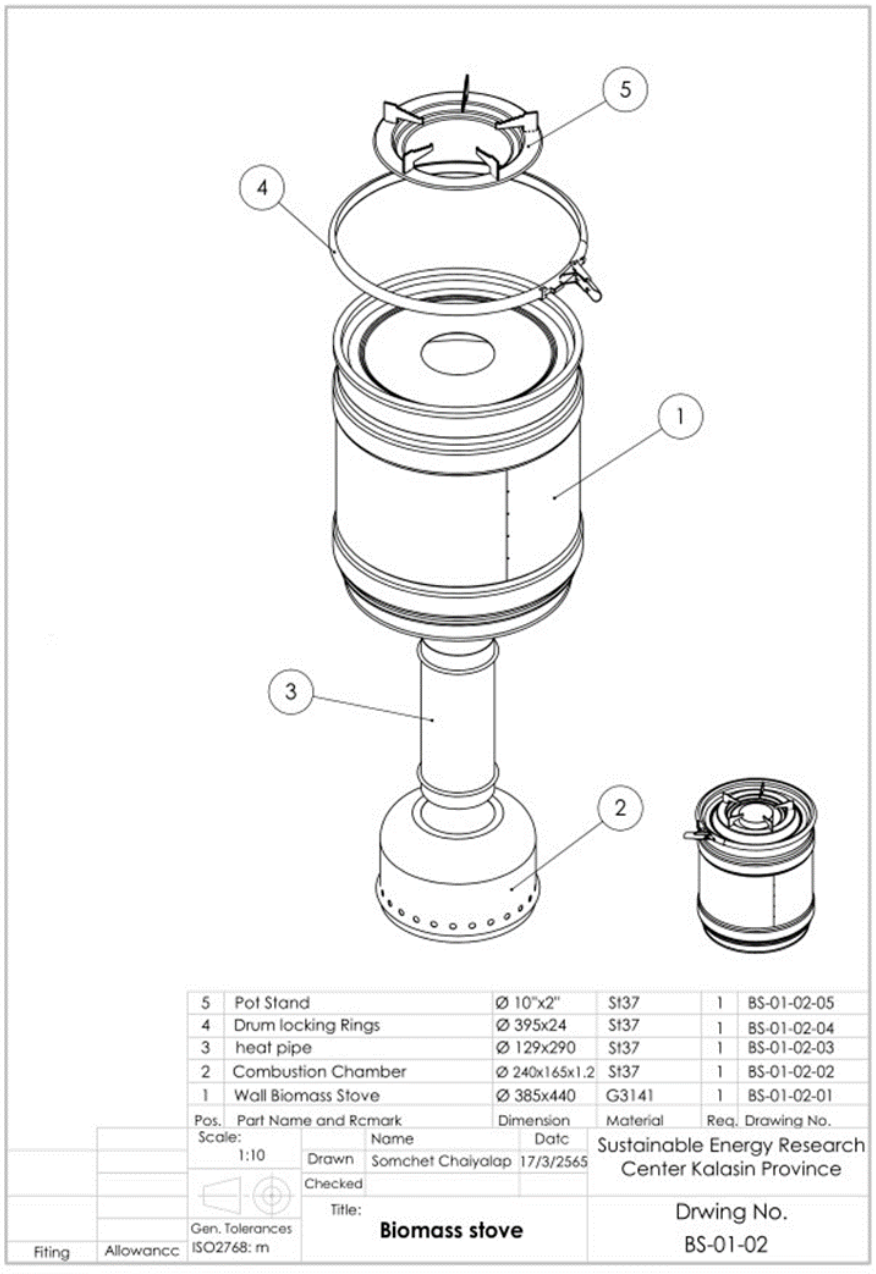
ภาพที่ 10 เตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้ (ก) ลักษณะของเตา (ข) ลักษณะการจุดเตา

3.2 การออกแบบ และจัดสร้างเตาต้นแบบ

จากการศึกษาและเลือกเตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้ เป็นเตาทดสอบ และนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาใช้ในการออกแบบและพัฒนาเตาต้นแบบ โดยมีรายละเอียดของการพัฒนาเตาต้นแบบดังต่อไปนี้

ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบเตาต้นแบบ โดยการปรับปรุงแกนของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ด้วยการใช้ถังน้ำยาแอร์ใช้แล้วมาประยุกต์ใช้ (ดังรูปที่ 3.4) โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมาจากโปรแกรมช่วยออกแบบทางคอมพิวเตอร์ Solid Work โดยในส่วนของแกนเตาที่พัฒนาขึ้นใหม่นั้น ได้รับการออกแบบให้มีขนาดความหนาของเหล็ก และความสูงเช่นเดียวกันกับแกนแบบเดิม คือ 4 มิลิเมตร และ 45 เซนติเมตรตามลำดับ แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นจะแตกต่างกันออกไป โดยด้านล่างบริเวณช่องอากาศเข้า ซึ่งมีระยะความสูง 15 เซนติเมตรนั้น จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 เซนติเมตร ใหญ่กว่าด้านบนซึ่งเป็นส่วนของอากาศที่เผาไหม้แล้วไหลออก ซึ่งมีค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 11.4 เซนติเมตร นอกจากนี้ ในส่วนของขนาดและตำแหน่งของรูแก๊สที่เจาะบนแกนเตาก็เปลี่ยนไปจากเดิม โดยรูมีขนาดเล็กลงเท่ากับ 4 มิลลิเมตร แต่เพิ่มจำนวนการเจาะมาก

ขึ้นที่จำนวนทั้งสิ้น 21 รู เพื่อทำให้การเปลี่ยนรูปไฮโดรคาร์บอนในเนื้อไม้เกิดได้ดีขึ้น โดยการออกแบบแกนเตาแบบ NCCS นั้น จะส่งผลทำให้การไหลเวียนของอากาศเข้าสู่การเผาไหม้ในปล่องได้ดีขึ้น และพื้นผิวของแกนเตาที่เพิ่มมากขึ้นในส่วนล่างจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณส่วนล่างของเตาดีขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ของเตา BEBC และเตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้ ดังกล่าวข้างต้นได้



ภาพที่ 11 รายละเอียดเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร และแกนเตาแบบ NCCS ที่ทำการออกแบบใหม่

ภาพที่ 12 การสร้างแกนเตาและตัวเตาโดยใช้วัสดุรีไซเคิลจากถังน้ำยาแอร์

3.3 การดำเนินการศึกษาวิจัย

หลังจากได้ต้นแบบเตาที่ได้รับการออกแบบแกนเตาใหม่แล้ว ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาการทำงานของเตาเปรียบเทียบกันกับเตาเดิมโดยทดสอบการใช้งานเปรียบเทียบกัน เพื่อหาค่าอุณหภูมิจุดต่าง ๆ ในเตา ความเร็วอากาศจากแกนเตา และระยะเวลาในการเผาไหม้ของเตา โดยใช้ชีวมวลในการผลิตถ่านชีวภาพและใช้เป็นเชื้อเพลิง คือ ไม้ไผ่เลี้ยงแห้ง ซึ่งการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อเนื่องกันวันละ 1 การทดลอง แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของเตาต้นแบบกับเตาทดสอบเพื่อพิจารณาผลด้านการพัฒนาเตา และทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากเตาทดสอบและเตาต้นแบบ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมด้านการนำไปใช้ประโยชน์ทางพลังงานและการเกษตร โดยสรุปเป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 2 วิธีการทดสอบเตา

วิธีการการทดสอบเตา	วัตถุประสงค์
1. วัดค่าอัตราการไหล	เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างอัตราการไหลของอากาศที่เกิดการเผาไหม้ในเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS
2. วัดค่าอุณหภูมิเตาในแต่ละตำแหน่ง	เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งและเปรียบเทียบความแตกต่าง

วิธีการการทดสอบเตา	วัตถุประสงค์
	ระหว่างเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS
3. วิเคราะห์อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในเตา	เพื่อวิเคราะห์สภาพของกระบวนการไพโรไลซิส และอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาแต่ละแบบ
4. วิเคราะห์ร้อยละของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตา	เพื่อหาปริมาณถ่านที่ได้เทียบกับไม้ที่ใช้ไป และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS
5. วิเคราะห์ร้อยละของแก๊สไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากเตา	เพื่อหาปริมาณแก๊สไพโรไลซิสที่ได้เทียบกับไม้ที่ใส่เข้าไป และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS
6. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่าน โดยใช้เทคนิค FTIR	เพื่อวิเคราะห์แถบความยาวคลื่นที่ปรากฏในถ่านที่ทดสอบ เพื่อจำแนกสารที่ปรากฏ หรือคงอยู่ในถ่าน
7. วิเคราะห์สัณฐานและส่วนประกอบของถ่าน โดยใช้กล้องโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM และ EDS)	เพื่อวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนของถ่านว่าอยู่ในเกณฑ์ใด และเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในถ่าน เปรียบเทียบกันระหว่างถ่านจากเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS
8. การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis) ของถ่าน	เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ในถ่านจากเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

3.4 การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร

ในการทดสอบเตานั้น จะใช้ไม้ไผ่แห้งตัดเป็นท่อนขนาดประมาณ 20 cm (ดังรูปที่ 3.5) โดยมีความชื้นที่ 9.4% ทำการชั่งก่อนบรรจุลงในเตา โดยใช้เครื่องชั่งยี่ห้อ Tixx รุ่น 40 kg (ดังรูปที่ 3.6) มีความละเอียดที่ทศนิยมสามตำแหน่ง โดยเตาจะถูกติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 3 แต่ง ได้แก่ด้าน บน กลาง และล่างของเตา ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งเตาจะถูกนำไปวางบนก้อนอิฐ หลังจะนั้นก็ทำการบรรจุไม้ไผ่เข้าในเตา โดยเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS สามารถบรรจุไม้ไผ่ได้ 27.37 kg ส่วนเตาที่ใช้แกนเตาแบบ

ECCS สามารถบรรจุไม้ไผ่ได้ 30.00 kg จากนั้นทำการปิดเตาและใส่ไม้เชื้อเพลิงลงในแกนเตาเพื่อเข้าสู่การจุดเตา เพื่อเริ่มการทดสอบ จำนวน 3 ครั้งต่อเนื่องกัน

ภาพที่ 13 ลักษณะของฟืนไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ 14 การชั่งน้ำหนักไม้ไผ่ที่บรรจุเข้าเตา

ภาพที่ 15 การวางเตาและติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในเตา

3.4.1 การวัดอัตราการไหลของอากาศจากแกนเตาระหว่างการเผาไหม้

หลังจากจุดเตา ทำการวัดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้เครื่องวัดการไหลของอากาศ Fluke 922 Airflow Meter (ดังรูปที่ 3.8) โดยเก็บข้อมูลทุก 5 นาที (ดังตาราง ที่ 3 และ 4 ในภาคผนวก ก.) โดยในการทดสอบสามารถวัดค่าได้จนถึงช่วงเริ่มต้นของกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อหลังจากนั้นอุณหภูมิจะสูงเกินย่านที่เครื่องมือจะทำการวัดได้ เมื่อได้ข้อมูลอัตราการไหลแล้ว การวิเคราะห์สถิติแบบ “paired sample t-test” ถูกนำมาใช้ในการหาความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่างเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P=0.05)

ภาพที่ 16 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากแกนเผาไหม้

3.4.2 การวัดค่าอุณหภูมิเตาในแต่ละตำแหน่ง

การวิเคราะห์อุณหภูมิการทำงานของเตาในแต่ละตำแหน่ง จะทำให้ทราบถึงการทำงานของเตาว่ามีความต่อเนื่องหรือไม่ การเกิดขึ้นของกระบวนการไพโรไลซิสภายในเตาว่าค่าอุณภูมิในแต่ละขณะเป็นเช่นใด เพียงพอที่จะกำจัดน้ำมันดินหรือไม่ (อุณหภูมิเตาสูงกว่า 500 °C) มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเตาทั้งสองกรณีหรือไม่ โดยเฉพาะด้านล่างของเตาที่มักจะเหลือไม้ที่เปลี่ยนเป็นถ่ายได้ไม่หมด โดยในการวัดค่านั้น จะทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ “type K” ในเตาแต่ละกรณีสามตำแหน่ง ได้แก่ ด้านล่างของเตา ที่ปล่องของแกนเตาหนึ่งตำแหน่ง (ดังรูปที่ 3.9) และอุณหภูมิแวดล้อมหนึ่งตำแหน่ง ทำการบันทึกค่าทุก 5 นาทีผ่านเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิรุ่น BTM-4208SD เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลดิจิทัลจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการไพโรไลซิส

ภาพที่ 17 a) แสดงเครื่องมือวัดอัตราการไหล b) เครื่องมือวัดและบันทึกอุณหภูมิ c) ตำแหน่งการวัดอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อได้ข้อมูลอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งแล้ว การวิเคราะห์สถิติแบบ “ANOVA” ถูกนำมาใช้ในการจำแนกความแตกต่าง ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในเตาเดียวกัน และเปรียบเทียบความแตกต่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างเตาทั้งสองกรณีที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P=0.05)\

3.4.3 วิเคราะห์อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในเตา

ทำการคำนวณหาอัตราความร้อน (heat rate, °C/min) ที่เกิดขึ้นในเตาแต่ละกรณีที่ตำแหน่ง Tl Tm และ Tu เพื่อวิเคราะห์ว่ากระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นในเตาเป็นแบบใด โดยการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาจากข้อมูลที่ทำการวัด ทำการสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราความร้อน หากอัตราความร้อนต่ำกว่า 10°C/min แสดงว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสช้า ซึ่งเหมาะต่อการผลิตถ่านชีวภาพ เนื่องจากจะได้รูพรุนมีขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นผิวสูง

3.4.4 วิเคราะห์ร้อยละของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตา

ร้อยละของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาแต่ละกรณี จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพด้านการผลิตถ่านชีวภาพเทียบกับปริมาณไม้ที่ใส่ในเตา โดยมีสมการ (3-1) ในการคำนวณ ดังนี้

$$\%BC = \frac{W_{BC}}{W_{IB} - W_{NC}} \times 100 \quad (3\text{-}1)$$

โดย *%BC* W_{BC} W_{IB} *และ* W_{NC} ในสมการที่ (3-1) ได้แก่ค่าร้อยละของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตา (%) ค่าน้ำหนักถ่านชีวภาพ (kg) ค่าน้ำหนักของไม้ไผ่ที่ใส่ในเตา (input biomass) และค่าน้ำหนักไม้เหลือที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นถ่าน (non-combustion biomass) ตามลำดับ โดยขณะทำการทดลองต้องทำการเก็บข้อมูลค่าต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น

3.4.5 วิเคราะห์ร้อยละของแก๊สไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากเตา

การวิเคราะห์ร้อยละของแก๊สไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากเตา จะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพด้านการผลิตแก๊สชีวภาพที่ได้จากเตา เทียบกับปริมาณไม้ที่ใส่ในเตา โดยมีสมการ (3-2) ในการคำนวณ ดังนี้

$$\%PG = \frac{W_{IB} - W_{SY}}{W_{IB}} \times 100 \quad (3\text{-}2)$$

โดย %PG และ WSY ในสมการ (3-2) ได้แก่ร้อยละของแก๊สไพโรไลซิสที่ได้จากเตา และน้ำหนักของแข็งทั้งหมดที่เกิดขึ้น (total solid yield)

3.4.6 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่าน โดยใช้เทคนิค FTIR

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่าน โดยใช้เทคนิค FTIR ได้ใช้เครื่องยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier and Spotlight 200i ซึ่งทำงานในช่วง 600–7,800 cm^{-1} ก่อนทำการทดสอบได้นำตัวอย่างถ่านไปทำการวัดค่าความต้านทานการนำไฟฟ้า ตัวอย่างถ่านที่ได้ค่าความต้านทานต่ำที่สุดในแต่ละกลุ่ม จะถูกนำไปทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งถ่านจะถูกอาบด้วยแป้งที่มีคุณสมบัติเฉพาะแล้ววางในจานแก้ว เพื่อนำไปใส่ในเครื่อง FTIR

ภาพที่ 18 เครื่อง FTIR รุ่น Frontier and Spotlight 200i ยี่ห้อ Perkin Elmer
(ที่มา: https://www.perkinelmer.com/)

3.4.7 วิเคราะห์สัณฐานและส่วนประกอบของถ่าน โดยใช้กล้องโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในการศึกษานี้ ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น TM4000Plus ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเช่น ลักษณะรูปร่างลวดลายเป็นผิวตัวอย่าง ตลอดจนขนาดของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ให้ข้อมูลพื้นฐานของโครงสร้าง พื้นผิว หรือรูปร่างของวัสดุอย่างชัดเจนที่

กำลังขยายสูง รวมไปถึงสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในบริเวณที่สนใจด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS) การเตรียมตัวอย่างก่อนศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนฯ มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติที่ดีและสามารถศึกษาและบันทึกภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกรณีของถ่านเป็นตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ก่อนที่จะศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) จำเป็นที่จะต้องลดความชื้นของตัวอย่างให้น้อยกว่า 6% เพื่อลดการสะสมประจุ (Charging effect) ที่ผิวของชิ้นงานซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการบันทึกภาพ ศึกษาบริเวณพื้นผิวของถ่าน ต้องนำถ่านมาตัดให้มีขนาดเล็กกว่าแท่นติดตัวอย่างและสามารถติดลงบนเทปกาวคาร์บอนได้ทันที ส่วนศึกษาโครงสร้างภายใน, การกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบ หรือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ทำได้โดยนำชิ้นตัวอย่างจุ่มในไนโตรเจนเหลว (อุณหภูมิ= -192 °C) ทำการหักตัวอย่างก่อนที่จะนำตัวอย่างมาติดบนแท่นตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์

ภาพที่ 19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (EDS) (ที่มา: https://res.msu.ac.th/centrallab/)

3.4.8 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis) ของถ่าน

การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารหรือการวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความชื้น สารระเหย (volatine matter content, VOC) เถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ที่อยู่ในถ่านชีวภาพ ซึ่งการ วิเคราะห์ดังกล่าวจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของ ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ รวมไปถึงปริมาณคาร์บอนที่ถ่าน ชีวภาพสามารถรักษาไว้หลังจากชีวมวลถูกย่อยสลายด้วยที่ความร้อน

ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของถ่าน ถูกกำหนดให้หาหลังอบที่ 105°C เป็นเวลาสองชั่วโมง ภายใต้การพ่นไนโตรเจน โดยถ่านชีวภาพประมาณ 0.5 กรัมจะถูกใส่ในเบ้าหลอมเซรามิก แล้วนำไปวางในเตาเผา พ่นด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 6 l/min เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 25 นาที เพื่อให้แน่ใจว่ามีการกำจัดออกซิเจนทั้งหมด ในระหว่างขั้นตอนการทำความร้อนต่อมา เตาจะถูกพ่นไล่ด้วยก๊าซไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 3 l/min หลังจากการทำความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เตาก็จะถูกปิด และตัวอย่างจะถูกย้ายไปยังเครื่องดูดความชื้นทันที ทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จากนั้นจึงชั่งน้ำหนัก โดยความชื้นหาได้จากสมการ (3-3) ได้แก่

$$\%Moisture = \frac{M_{initial} - M_{OD-BC}}{M_{OB-BC}} \times 100 \qquad (3\text{-}3)$$

โดย $M_{initial}$ M_{OD-BC} และ M_{OB-BC} ในสมการ (3-3) ได้แก่ ค่ามวลเริ่มต้นของถ่าน (หน่วย g) มวลของถ่านหลังจากอบที่ 103°C (g) และมวลของถ่านหลังอบที่ 730°C (g) ตามลำดับ

ในส่วนของการหาค่า VOC นั้น ถ่านชีวภาพจะถูกให้ความร้อนในเตาอบ ภายใต้การผ่นก๊าซไนโตรเจน จนกระทั่งถึงอุณหภูมิการแยกตัวของสารระเหย (Volatime Matter Content, VOC) หรือคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon, FC) ต่างๆ ในการหาค่าอุณหภูมิการแยกตัวของสารระเหยที่เหมาสมนั้น ถ่านจะถูกให้ความร้อนที่ 2 °C/min จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งต่างกันเก้าค่า ได้แก่ 350°C 550°C 650°C 700°C 750°C 800°C 850°C 900°C และ 950°C ในระหว่างการทำความร้อนนั้น ถ้วยใส่ตัวอย่างที่บรรจุถ่านไบโอชาร์ถูกปิดด้วยฝาเซรามิก และวางไว้ในกล่องสแตนเลสภายในเตาเผา มีการสอดท่อพ่นก๊าซไนโตรเจนลงไปในกล่องสแตนเลสผ่านรูเล็กๆ ในฝาปิดกล่อง กล่องถูกไล่อากาศด้วยแก๊ส N2 เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาทีที่อัตราการไหล 6 l/min หลังจากการไล่ครั้งแรก อัตราการไหลของไนโตรเจนให้ลดลงเหลือ 3 l/min จากนั้นตั้งเตาเผาไว้ที่อุณหภูมิการแยกสูงสุดที่ต้องการและเปิดทำงาน มีการวัดอุณหภูมิภายในกล่องสแตนเลสทุก ๆ 60 วินาทีระหว่างการให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิภายในกล่องสแตนเลสถึงอุณหภูมิการแยก VOC หรือ FC ที่ต้องการ เตาจะถูกปิดและประตูเตาก็เปิดออก คงการพ่นก๊าซไนโตรเจนภายในกล่องสเตนเลสไว้ที่อัตรา 3 l/min ระหว่างการทำให้เย็นลงเป็นเวลา 2- 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักถ้วยใส่ตัวอย่างเพื่อกำหนดมวลของ FC + เถ้า (M_{FC+ash}) โดยการเอาน้ำหนักที่ได้ลบน้ำหนักถ้วยใส่ตัวอย่างเปล่า

ร้อยละของสารยะเหยในถ่านชีวภาพ หาได้จากสมการ (3-4) นั่นคือ

$$\%VOC = \frac{M_{OD-BC} - M_{FC+Ash}}{M_{OD-BC}} \times 100 \quad (3\text{-}4)$$

โดย M_{FC+ash} คือ มวลของคาร์บอนคงตัวรวมกับเถ้า (g) ซึ่งปริมาณเถ้าของถ่านชีวภาพถูกกำหนดโดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างเดียวกันจนถึง 730°C โดยใช้เตาเผาแบบเดียวกัน เพื่อให้แน่ใจว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ จึงต้องถอดฝาถ้วยใส่ตัวอย่างออก และอากาศไหลที่ 1.5 l/min ผ่านเข้าเตาเผาอย่างต่อเนื่อง เตาถูกให้ความร้อนที่ 730°C และคงไว้ที่อุณหภูมินั้นข้ามคืน (8-10 ชั่วโมง) หลังจากนั้น เตาจะถูกปิดและปล่อยให้เย็นเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงก่อนที่ตัวอย่างจะถูกถ่ายโอนไปยังเครื่องดูดความชื้นเพื่อทำให้เย็นลง ชั่งน้ำหนักถ้วยใส่ตัวอย่าง และมวลเถ้า (M_{ash}) ถูกกำหนดโดยการลบน้ำหนักของถ้วยใส่ตัวอย่างที่ว่างเปล่าออก โดยร้อยละของเถ้าที่เกิดขึ้นหาได้จากสมการ (3-5) นั่นคือ

$$\%Ash = \frac{M_{ash}}{M_{OD-BC}} \times 100 \quad (3\text{-}5)$$

โดย Mash คือมวลของเถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาถ่านชีวภาพที่ 730°C และในส่วนของร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่าน (*%FC*) หาได้จากสมการ (3-6) นั่นคือ

$$\%FC = \frac{M_{FC+ash} + M_{ash}}{M_{OD-BC}} \times 100 \quad (3\text{-}6)$$

ปริมาณต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ จะถูกนำไปใช้ในการประเมินคุณภาพของถ่านชีวภาพร่วมกับผลจากการวิเคราะห์โดย SEM และ EDS ร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่สูง จะทำให้คุณสมบัติด้านการกักเก็บคาร์บอนของถ่านชีวภาพมีความโดดเด่น ร้อยละของสารละเหยที่ต่ำบ่งบอกถึงการเจือปนที่ต่ำซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปเป็นถ่านหุงต้มหรือถ่านไร้ควัน เป็นต้น

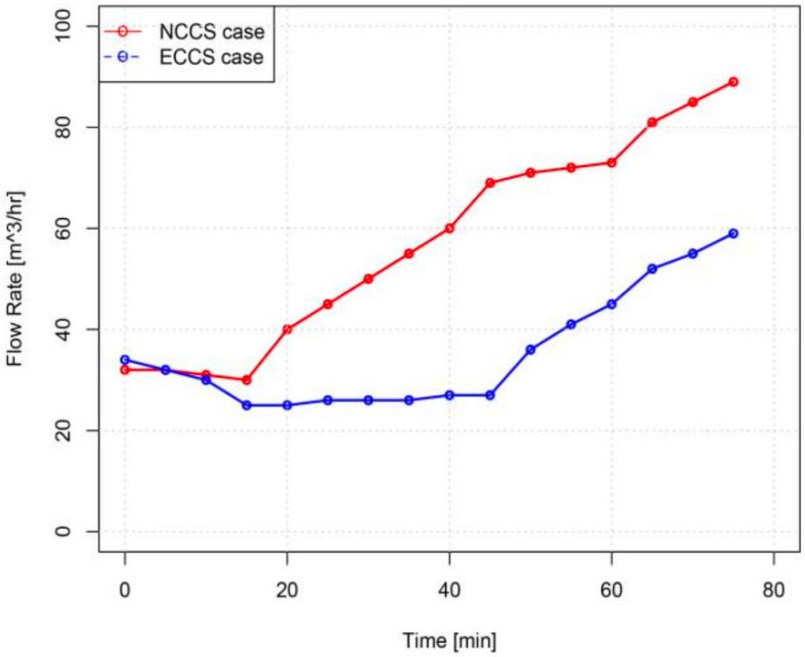
พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 การไหลของอากาศหลังการเผาไหม้

หลังจากทำการปรับปรุงแกนของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรแล้ว เตาดังกล่าวได้ถูกทำการทดสอบอัตราการไหลของอากาศระหว่างการเผาไหม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิทำงานของเตาที่ตำแหน่งต่าง ๆ เปรียบเทียบกันกันรูปแบบเดิม ว่ามีค่าอุณหภูมิและรูปแบบการเผาไหม้ของเตาแตกต่างไปจากเดิมเช่นใด โดยผลลัพธ์ของอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเครื่องวัดการไหลของอากาศ Fluke 922 หลังจากจุดเตา แสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งผลลัพธ์ในรูปแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของอากาศในแกนเตาแบบ NCCS สูงกว่าแกนเตาแบบ ECCS การไหลของอากาศเฉลี่ยก่อนเริ่มไพโรไลซิสสำหรับแกนเตาแบบ NCCS คือ 57.25 ลบ.ม./ชม. (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งสูงกว่าแกนเตาเดิม (ECCS) ถึง 62.24% ลักษณะดังกล่าวอธิบายว่าการใช้แกนเตาแบบ NCCS ที่มีขนาดช่องอากาศขาเข้าที่ใหญ่ขึ้นกับเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรนั้น สามารถช่วยเพิ่มการไหลของอากาศเผาไหม้ในเตาส่งผลให้เกิดความต่อเนื่องของการเผาไหม้ดีกว่าแกนเตาแบบ ECCS อย่างไรก็ดี การวัดอัตราการไหลนี้สามารถทำได้ในช่วงของการจุดเตาไปจนถึงช่วงเริ่มต้นของการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสเท่านั้น (จำนวนข้อมูล 48 จุด) เนื่องจากเมื่อเลยช่วงดังกล่าวอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศหลังการเผาไหม้จะมีค่าสูงมากเกินกว่าการทำงานของเครื่องมือที่จะทำการวัดได้

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว



ภาพที่ 20 อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนทางออกของประเภท NCCS และ ECCS

ตารางที่ 3 ข้อมูลทางสถิติของอัตราการไหลของอากาศจากแกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

รูปแบบแกนเตา	ค่าเฉลี่ย	จำนวนข้อมูล	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (Std. Error of Mean)
NCCS	57.25	48	20.21	2.91
ECCS	35.31	48	11.64	1.68

การทดสอบอัตราการไหลระหว่างแกนเตาแบบ NCCS และ ECCS ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่นั้น ได้ใช้เทคนิคการทดสอบทางสถิติของข้อมูลสองกลุ่มแบบที (Paired-Sample t test) ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าอัตราการไหลในแกนเตาแบบ NCCS นั้นมีความแตกต่างจากแกนเตาแบบ ECCS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P = 0.000) โดยค่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นนั้นสัมพันธ์กับลักษณะของแกนเตาแบบ NCCS ที่มีส่วนล่างของแกนใหญ่ขึ้นทำให้ปริมาตรอากาศไหลเข้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำให้อากาศไหลเข้าเผาไหม้ในแกนเตาดีขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราการไหลของแกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

ค่าเฉลี่ย (M)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (Std. Error of Mean)	ช่วงความเชื่อมั่นของความแตกต่าง ที่ 95%		ค่า t	df	Sig. (2-tailed)
			lower	upper			
21.29	14.20	2.05	17.81	26.06	10.69	47	0.000

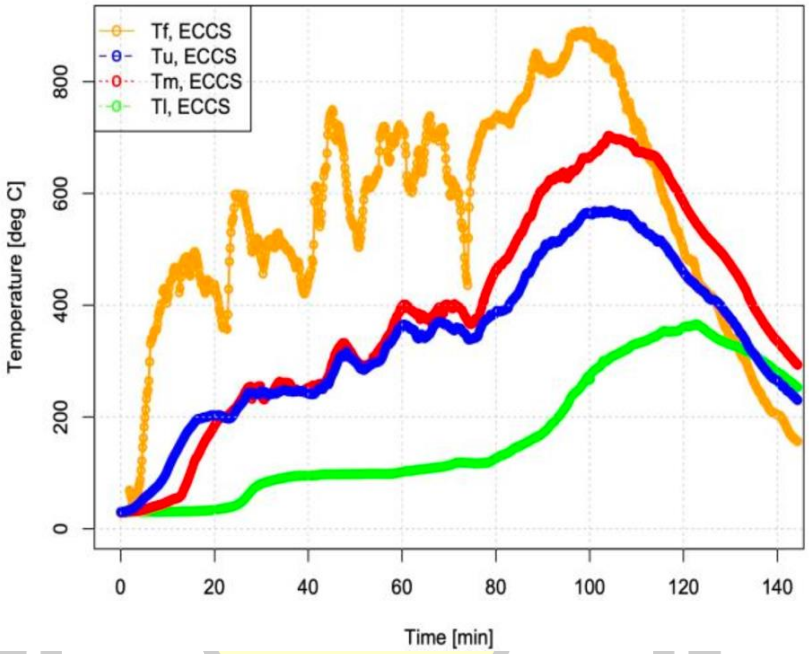
4.2 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา

ในการทดสอบการทำงานของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS เทียบกับแกนเตาแบบ ECCS นั้น เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิได้ถูกนำมาใช้ในการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 อุณหภูมิที่บันทึกไว้หลังจากจุดเตาแสดงในภาพที่ 4.2 โดยเส้นกราฟอุณหภูมิ T_l (สีเขียว) T_m (สีแดง) และ T_u (สีน้ำเงิน) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในส่วนไพโรไลซิสด้านล่าง กลาง และบนของเตาตามลำดับ ส่วนเส้นอุณหภูมิ T_f (สีส้ม) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลวไฟที่ออกจากแกนเตา

กรณีเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS

ข้อมูลจากกราฟในภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ ในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ที่มีแกนเตาแบบ ECCS นั้นมีการมีเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นสลับกับลดลงอยู่เรื่อย ๆ โดยเฉพาะในช่วง 75 นาทีแรกหลังจากจุดเตา การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนมากในเส้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเปลวไฟที่ออกจากแกนเตา (เส้นสีส้ม) ซึ่งลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการหยุดชะงักของเปลวไฟในแกนเตา อันมีสาเหตุมาลักษณะของแกนเตาแบบ ECCS นั้นมีขนาดของช่องอากาศไหลเข้าเล็กเกินไป ประกอบกับการปิดกั้นของไม้เชื้อเพลิงสำหรับจุดเตาและเถ้าที่เกิดขึ้นทำให้อัตราการไหลของอากาศในช่วงเริ่มต้นที่ต่ำเกินไป ส่งผลให้อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ นำไปสู่การดับของเปลวไฟในปล่อง และส่งผลต่อค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในจังหวะดังกล่าวลดลงด้วย ทำให้ผู้ใช้งานต้องคอยช่วยทำให้อากาศที่อุดตันไหลเวียนได้ดีขึ้น เปลวไฟจึงติดได้อีกครั้งพร้อมกับค่าอุณหภูมิเปลวไฟที่วัดค่าได้สูงขึ้นนั่นเอง ลักษณะดังกล่าวทำให้ผู้ใช้ต้องควบคุมในช่วงของการจุดเตาอยู่ตลอด ทำให้เกิดความยุ่งยากและทำให้ใช้เวลาในการผลิตถ่านชีวภาพนานขึ้นด้วย จากภาพที่ 4.2 เมื่อ

เลยนาทีที่ 75 ไป กระบวนการไพโรไลซีสในเตาเริ่มเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิเตาที่ตำแหน่งต่าง ๆ สูงขึ้น และก๊าซชีวภาพก็ถูกขับออกมาอย่างต่อเนื่องสู่แกนเตา การเผาไหม้จึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิเปลวสูงขึ้น ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นประมาณ 65 นาที ก๊าซชีวภาพที่ขับออกมาจึงหมดลง ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วแกนเตาแบบ ECCS จะทำให้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ใช้เวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขณะที่ก๊าซชีวภาพหมดลง ทั้งสิ้น 140 นาที



ภาพที่ 21 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS

ข้อจากตารางที่ 3 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาของอุณหภูมิภายในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 L ที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดเฉลี่ยของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS ($T_{f,ECCS}$) มีค่าเท่ากับ 890.23°C และในส่วนของอุณหภูมิในบริเวณที่เกิดกระบวนการไพโรไลซิสนั้นพบว่า $T_{u,ECCS}$ และ $T_{m,ECCS}$ มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยมากกว่า 500°C อธิบายได้ว่าไม้ไผ่ในบริเวณส่วนกลางและส่วนบนของเตานั้นเกิดการเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในส่วนล่างของเตาพบว่ามีค่าเท่ากับ 365.73°C ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้ไม้ไผ่ในบริเวณส่วนล่างเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมด และไม่สามารถขจัดน้ำมันดิน (Tar) ให้หมดไปจากถ่านได้

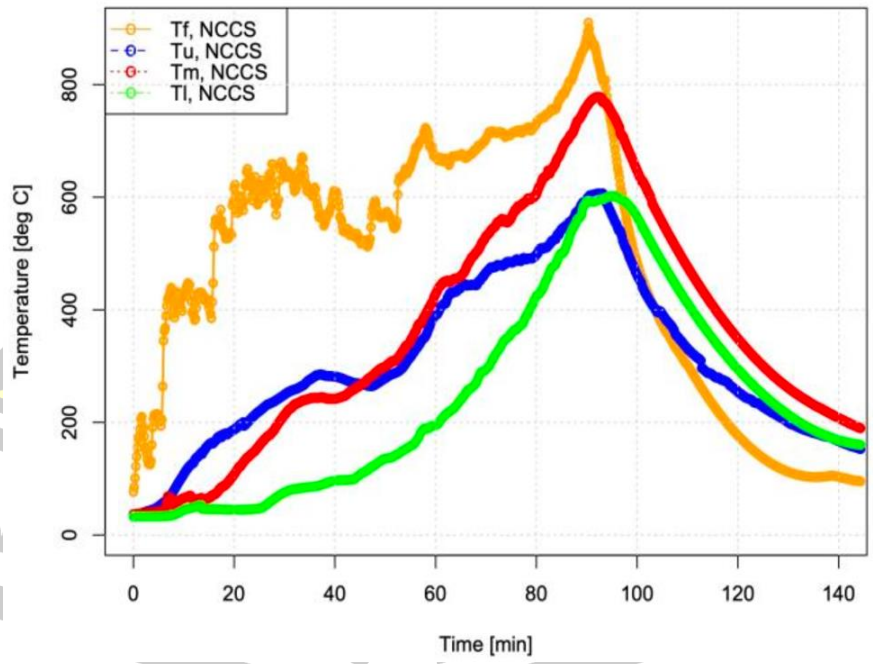
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาของอุณหภูมิภายในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 L ที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

อุณหภูมิ	N	M	SD	SE	ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับค่าเฉลี่ย 95%		Min	Max
					Upper bound	Lower bound		
$T_{l,\ NCCS}$	867	244.65	177.61	6.03	232.81	256.49	32.77	602.00
$T_{l,\ ECCS}$	867	167.64	113.98	3.87	160.04	175.24	30.13	365.73
Total	1734	206.14	154.07	3.70	198.89	213.40	30.13	602.00
$T_{m,NCCS}$	867	358.96	209.08	7.10	345.02	372.89	36.83	778.17
$T_{m,\ ECCS}$	867	386.25	192.35	6.53	373.43	399.08	29.77	703.23
Total	1734	372.60	201.29	4.83	363.12	382.09	29.77	778.17
$T_{u,\ NCCS}$	867	309.54	146.21	4.96	299.80	319.29	32.63	606.80
$T_{u,\ ECCS}$	867	337.48	139.16	4.72	328.20	346.76	30.10	569.70
Total	1734	323.51	143.37	3.44	316.76	330.27	30.10	606.80
$T_{f,\ NCCS}$	867	481.26	234.56	7.96	465.62	496.89	76.73	909.93
$T_{f,\ ECCS}$	867	557.19	206.05	6.99	543.45	570.92	27.90	890.23
Total	1734	519.22	223.95	5.37	508.67	529.77	27.90	909.93
All	**63936**	**355.37**	**215.26**	**2.58**	**350.30**	**360.44**	**27.90**	**909.93**

กรณีเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS

ในกรณีเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS นั้นอุณหภูมิที่ตำแหน่งในขณะใช้งานได้แสดงในภาพที่ 4.3 เนื่องจากแกนเตากรณีนี้ได้รับการปรับปรุงในด้านอัตราการไหลของอากาศในแกนเผาไหม้ และเนื่องจากปริมาตรของแกนที่มากขึ้น ทำให้สามารถบรรจุฟืนในแกนกลางอย่างเพียงพอ (ไม่ต้องเติมฟืนในแกนเพิ่มระหว่างจุดเตา) จากภาพที่ 4.3 เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแลงอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสภายในเตากรณีนี้ มีความคงตัวมากกว่าในกรณี ECCS ถึงแม้อุณหภูมิเปลวไฟจะลดลงในนาทีที่ 35 หลังจากจุดเตา เนื่องจากเข้าสู่ช่วงของการคายก๊าซซึ่งต้องใช้ความร้อนขั้นตอนดังกล่าว อีกทั้งมีเถ้าไม้ฟืนในปล่องอุดตัน แต่ด้วยแกนเตามีช่องอากาศไหลเข้าที่ใหญ่ทำให้เกิดแรงดันของอากาศเข้าสู่การเผาไหม้ในแกนได้ ประกอบกับไม้ฟืนที่บรรจุอยู่ภายในแกนอย่างเพียงพอทำให้

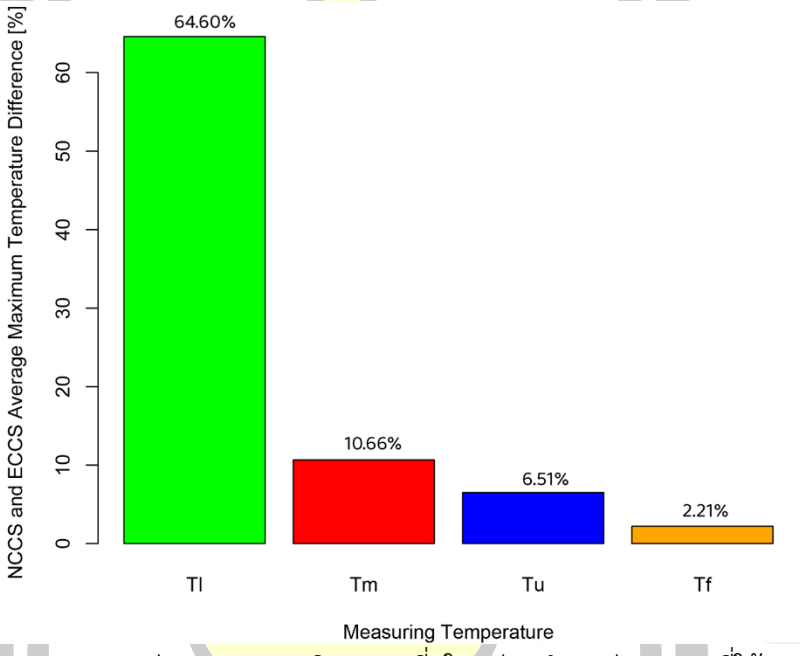
เกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยไม่จำเป็นต้องให้ผู้ใช้งานคอยควบคุมระหว่างช่วงเริ่มต้นของการจุดเตา ทำให้วิธีกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพของเตาเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสเริ่มต้นในนาทีที่ 45 หลังจากจุดเตา และใช้เวลาจากนั้นไป 75 นาที จึงสิ้นสุดกระบวนการจ่ายก๊าซชีวภาพจากเตา โดยระยะเวลาทั้งหมดตั้งแต่เริ่มจุดเตาไปจนถึงสิ้นสุดการปล่อยก๊าซโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 120 นาที ซึ่งก็หมายความว่ากรณีใช้เวลาในการผลิตถ่านชีวภาพสั้นกว่ากรณีเตาที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้งในกรณีของแกนเตาแบบ NCCS แสดงในตารางที่ 4.3 โดยจากจากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของเปลวไฟ ($T_{f,\ NCCS}$) ในกรณีนี้คือ 909.93°C ส่วนค่าอุณหภูมิสูงสุดค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสที่ตำแหน่ง $T_{l,\ NCCS}$ $T_{m,\ NCCS}$ และ $T_{u,\ NCCS}$ มีค่าเป็น 560.5 655.1 และ 788.7°C ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งหมดสูงกว่าในกรณีของแกนเตาแบบ ECCS อุณหภูมิไพโรไลซิสในกรณีของแกนเตาแบบ NCCS นี้สูงถึงมากกว่า 500°C ซึ่งอยู่ในช่วงการผลิตถ่านชีวภาพที่เหมาะสมที่สุด (Brady et al., 2008; Klüpfel et al., 2014; Lehmann, 2015) และเพียงพอที่จะขจัดสารระเหยในกลุ่มของน้ำมันดิน (tar) และทำให้เกิดขนาดรูพรุนขนาดเล็กขึ้นภายในถ่าน (Lee et al., 2013)



ภาพที่ 22 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS

เมื่อทำการเปรียบเทียบแกนเตาแบบ NCCS และ ECCS โดยใช้สถิติ ANOVA โดยใช้ข้อมูลเชิงพรรณนาของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละจุดในเตาที่ใช้แกนเตาในแต่ละกรณี (ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3)

พบว่า กรณีแกนเตาแบบ NCCS มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในส่วนล่างของเตา ($T_{l,NCCS}$) เท่ากับ 602.00°C ซึ่งสูงกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในส่วนล่างของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ ($T_{l,ECCS}$) ถึงร้อยละ 64.6 (ดังภาพที่ 4.4) อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย $T_{l,\ NCCS}$ ในช่วงพีโรไลซิสมีค่าสูงกว่า 500°C เป็นเวลา 20 นาที (ภาพที่ 4.3) ซึ่งมีความสำคัญต่อการผลิตคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ให้ได้ปริมาณสูง รวมถึงการลดสารระเหยที่มีอยู่ในถ่านชีวภาพที่ทำได้ดีขึ้นด้วย



ภาพที่ 23 ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

จากการทดสอบผลลัพธ์ ANOVA (ตารางที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่าคู่ของ T_l, T_m, T_u และ T_f มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ในทุกกรณี ค่าความแตกต่างที่มากที่สุดพบในอุณหภูมิโซนล่าง (T_l) โดยมีค่า F สูงสุดคือ 115.443 ส่วนความแตกต่างมากเป็นอันดับที่ 2 และ 3 พบใน T_f และ T_u ตามลำดับ ในขณะที่ Tm มีความแตกต่างน้อยที่สุด นอกจากนี้ แผนภูมิแท่งในภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแกนเตาแบบ NCCS ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญที่สุดที่อุณหภูมิไพโรไลซิสในบริเวณด้านล่างของเตา (T_l) ผลการทดลองต่าง ๆ เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสและลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ได้รับการปรับปรุงโดยใช้แกนเตาแบบ NCCS

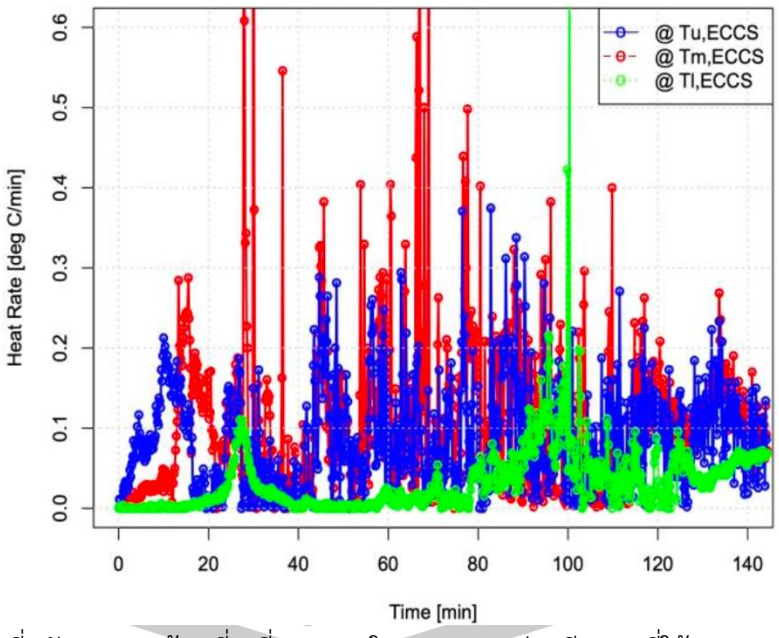
ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ ANOVA ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

ตำแหน่งอุณหภูมิ	รูปแบบการวิเคราะห์	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
T_l	Between Groups	2.570E6	1	2.570E6	115.443	0.000
	Within Groups	3.857E7	1732	22269.73		
	Total	4.114E7	1733			
T_m	Between Groups	3.230E5	1	3.230E5	8.005	0.005
	Within Groups	6.990E7	1732	40357.81		
	Total	7.022E7	1733			
T_u	Between Groups	3.382E5	1	3.382E5	16.604	0.000
	Within Groups	3.529E7	1732	20374.074		
	Total	3.563E7	1733			
T_f	Between Groups	2.499E6	1	12.499E6	51.275	0.000
	Within Groups	8.442E7	1732	48740.197		
	Total	8.692E7	1733			
All	Between Groups	9.317E7	7	1.331E7	404.141	0.000
	Within Groups	2.282E8	6928	32935.456		
	Total	3.214E8	6935			

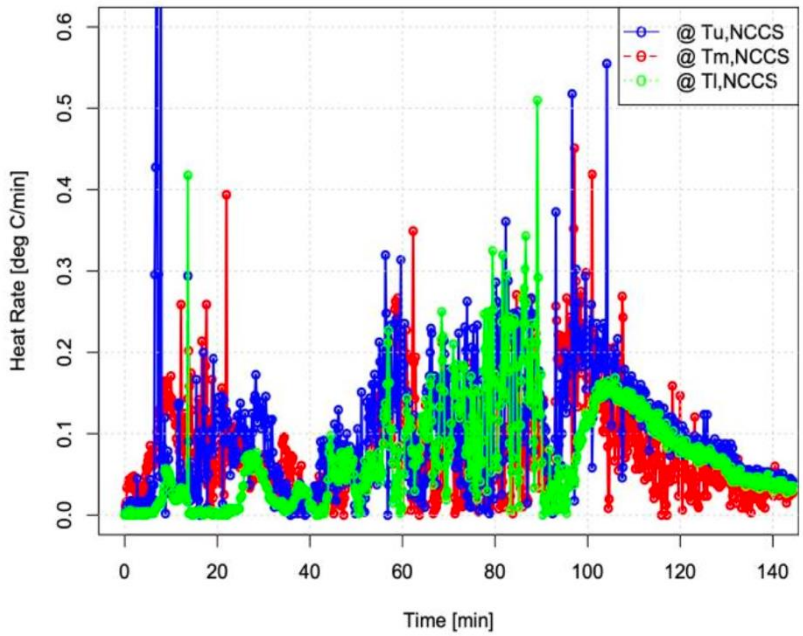
4.3 การวิเคราะห์อัตราการความร้อน

ภาพที่ 4.5 และ 4.6 แสดงอัตราความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ ในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในทั้งสองกรณี ส่วนบน กลาง และล่างเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร จะแสดงด้วยเส้นสีแดง น้ำเงิน และเขียว ตามลำดับ ข้อมูลในภาพที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างที่สำคัญสองประการระหว่างกรณีแกนเตาแบบ ECCS และ NCCS อย่างแรกคือค่าของอัตราความร้อน และอย่างที่สองคือรูปแบบของเส้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าอัตราความร้อนในทั้งสองกรณีน้อยกว่า 10 °C/min ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งเป็นผลดีต่อการผลิตถ่านชีวภาพ (Wang et al., 2018; Zhao et al., 2019; Shen & Wu, 2023; Abdullha et al., 2023) โดยแกนเตาทั้งสองกรณีทำให้เกิดความแตกต่างของอัตราความร้อนที่บริเวณด้านบนของเตา (T_U) ซึ่งได้รับการยืนยันจากข้อมูลการทดสอบ ANOVA ถึงความแตกต่างดังกล่าวในตารางที่ 4.6 ($P = 0.048$) นอกจากนั้น ยังมีความแตกต่างอย่างมากระหว่างอัตราความร้อนที่ตรงกลาง (T_m) ($P = 0.002$) และส่วนล่าง (T_l) ($P = 0.000$) อัตราความร้อนที่ส่วนล่างของเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS จะสูงกว่ากรณีใช้แกนเตาแบบ ECCS ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในเตาเดียวกันพบว่า อัตราความร้อนที่ส่วนล่างของเตาจะน้อยกว่าที่ส่วนกลางและส่วนบนของเตาในทั้งสองกรณี



ภาพที่ 24 ค่าเฉลี่ยอัตราความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในเตาเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS



ภาพที่ 25 ค่าเฉลี่ยอัตราความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในเตาเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS

ตารางที่ **7** ข้อมูลทางสถิติของอัตราความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS

Position	N	M	SD	SE (*E-3)	95% Confidence Interval for Mean		Min	Max
					Lower Bound	Upper Bound		
$T_{l,\ NCCS}$	867	0.0703	0.0635	2.15	0.0661	0.0745	0.000	0.5098
$T_{l,\ ECCS}$	867	0.0329	0.0422	1.43	0.0301	0.0357	0.000	0.6382
Total	1734	0.0516	0.0570	1.37	0.0489	0.0543	0.000	0.6382
$T_{m,\ NCCS}$	867	0.1004	0.0781	2.65	0.0952	0.1056	0.000	0.7895
$T_{m,\ ECCS}$	867	0.1102	0.0998	3.38	0.1036	0.1169	0.000	0.8666
Total	1734	0.1053	0.0897	2.15	0.1011	0.1095	0.000	0.8666
$T_{u,\ NCCS}$	867	0.0796	0.0647	2.19	0.0753	0.0839	0.000	0.4509
$T_{u,\ ECCS}$	867	0.0851	0.0644	2.18	0.0815	0.0901	0.000	0.3745
Total	1734	0.0827	0.0646	1.55	0.0797	0.0857	0.000	0.4509
All	5202	0.7991	0.7513	1.04	0.7787	0.0819	0.000	0.8666

ตารางที่ 4.6 ตารางการวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราความร้อนระหว่างเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS และ ECCS โดยใช้การทดสอบแบบ ANOVA

ตำแหน่งอุณหภูมิ	รูปแบบการวิเคราะห์	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
T_l	Between Groups	0.606	1	0.606	208.220	0.000
	Within Groups	5.041	1732	0.003		
	Total	5.647	1733			
T_m	Between Groups	0.042	1	0.042	5.248	0.022
	Within Groups	13.915	1732	0.008		
	Total	13.975	1733			
T_u	Between Groups	0.016	1	0.016	3.907	0.048
	Within Groups	7.217	1732	0.004		
	Total	7.234	1733			
All	Between Groups	3.185	5	0.637	126.471	0.000
	Within Groups	26.173	5196	0.005		
	Total	29.358	5201			

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราความร้อนในเตาที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS ข้างต้นเกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของรูก๊าซที่เจาะบนแกนเตาในกรณี ECCS มีขนาดใหญ่กว่าในกรณี NCCS จึงส่งผลให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสถูกจ่ายออกมายังแกนเตาอย่างรวดเร็ว ทำให้การเผาไหม้ในแกนเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านไปยังผนังส่วนตรงกลาง (สีแดง) และส่วนบน (สีน้ำเงิน) ของเตาสูงตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.5 แต่ด้วยอัตราการปล่อยก๊าซออกจากเตาที่เกิดขึ้นสูงนั้นเอง ส่งผลให้ก๊าซร้อนที่เกิดจากเกิดกระบวนการไพโรไลซิสส่วนบนและกลางเตา มีเวลาไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับไม้ในส่วนล่างของเตา (Antal & Grønli, 2003; Crombie & Mašek, 2015) และด้วยรูปแบบแกนเตาแบบเดิมซึ่งเป็นในทรงกระบอกตรงนั้นทำให้แกนเตาแบบ ECCS มีขนาดพื้นผิวและเวลาในการถ่ายโอนความร้อนในจากเปลวไฟในแกนเตาไปยังห้องไพโรไลซิสส่วนล่างของ

เตาน้อยเกินไป ดังนั้นอัตราความร้อนในเตาตอนล่าง (เส้นสีเขียวในภาพที่ 4.5) จึงไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนไม้ไผ่ให้เป็นถ่านได้ทั้งหมด ส่งผลให้เกิดน้ำมันดินและไม้ไผ่ที่ยังไหม้ไม่หมดเหลืออยู่ที่ด้านล่างของเตา (ภาพที่ 4.7)

ภาพที่ 26 ลักษณะของถ่านที่ได้จากเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ (a) แกนเตาแบบ ECCS และ (b) แกนเตาแบบ NCCS

ในกรณี NCCS นั้นแกนเตาถูกออกแบบใหม่ ให้มีปริมาตรและพื้นที่ผิวที่ใหญ่กว่าที่บริเวณส่วนล่างของแกน ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดการเผาไหม้ไม้เชื้อเพลิงในแกนส่วนล่าง ถ่ายโอนไปยังย่านที่เกิดกระบวนการไพโรไลซิสในส่วนล่างของเตาได้ดีขึ้น ทำให้ค่าอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนล่วงของเตามีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงด้วยเส้นสีเขียวในภาพที่ 4.6 นอกจากนี้ ในส่วนช่องอากาศเข้าขนาดใหญ่ของแกนยังส่งผลให้การไหลเวียนของอากาศที่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงและไม้เชื้อเพลิงในแกนเผาไหม้ ดังนั้น รูปแบบเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงอัตราความร้อนจึงมีความผันผวนน้อยกว่าในกรณีแกนแบบ ECCS อย่างไรก็ตาม ขนาดของรูก๊าซที่มีขนาดที่เล็กกว่านั้น ส่งผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการไพโรไลซิสสู่แกนการเผาไหม้ช้าลง การปล่อยก๊าซไพโรไลซิสที่ช้ากว่าในช่วงเริ่มต้นกระบวนการไพโรไลซิส (ที่ 50-75 นาทีในภาพที่ 4.3) ช่วยให้ไอสารอินทรีย์ที่ออกจากเนื้อไม้มีเวลามากขึ้นในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในเตาด้วยกระบวนการแบบคายความร้อน ทำให้เกิด H_2 และ CO มากขึ้นด้วย (Antal & Grønli, 2003; Crombie & Mašek, 2015) ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิสูงสุดสูงขึ้นที่ช่วงสุดท้ายของกระบวนการไพโรไลซิสในเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS (ดังภาพที่ 4.3) และไม้ได้กลายเป็นถ่านชีวภาพทั้งหมดโดยไม่เหลือสภาพของน้ำมันดินในถ่านชีวภาพ (ดังภาพที่ 4.7)

4.4 ผลผลิตถ่านชีวภาพและปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง

จากการทดสอบเตาพบว่าน้ำหนักรวมของผลผลิตที่เป็นของแข็ง (weight of total solid yield, W_{SY}) และน้ำหนักของผลผลิตถ่านชีวภาพ (weight of biochar yield, WBC) ในกรณีของเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS มีค่าเท่ากับ 2.50 และ 2.45 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS เล็กน้อย (ตารางที่ 4.7) กรณีที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS มีความโดดเด่นมากกว่ากรณีของแกนเตาแบบ NCCS ในกรณีนี้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารายละเอียดทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ได้จากกรณีแกนเตาแบบ ECCS ในภาพที่ 4.79a แสดงให้เห็นถึงการปนเปื้อนของน้ำมันดินและส่วนหนึ่งของท่อนไม้ไผ่ที่ยังเผาไหม้ไม่หมด (ปริมาณ 0.35 กก.) ส่วนภาพที่ 4.7b แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากกรณีแกนเตาแบบ NCCS นั้นดีกว่าผลิตภัณฑ์จากกรณีแกนเตาแบบ ECCS โดยที่ท่อนไม้ไผ่ทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพและก๊าซเชื้อเพลิง โดยไม่เหลือสภาพการปนเปื้อนของน้ำมันดินในถ่าน ข้อมูลร้อยการการผลิตถ่านชีวภาพ (%BC) ที่เกิดขึ้นโดยกรณีแกนเตาแบบ NCCS อยู่ที่ 27.37% (ดังแสดงในตารางที่ 4.7) อยู่ในย่านของการผลิตถ่านชีวภาพโดยเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ที่สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ มณีฉัตรและคำแดง (2022) สิทธิโอฐและคณะ (2565) และ ปันโยใหญ่ และคณะ. (2019) ซึ่งร้อยการการผลิตถ่านที่ได้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นและมีความแตกต่างในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 8 ข้อมูลน้ำหนักถ่านชีวภาพ (เฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง)

Parameter	ECCS case	NCCS case
W_{BC} (kg)	2.60	2.45
W_{SY} (kg)	2.96	2.50
W_{NC} (kg)	0.36	0.05
W_{IB} (kg)	9.00	9.00
%BC	30.00	27.37
%PG	67.11	72.22

ผลลัพธ์ในส่วนของร้อยละของก๊าซเชื้อเพลิง (%PG) ที่สูงขึ้นและ %BG ที่ต่ำลง ในกรณีแกนเตาแบบ NCCS นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยข้อเท็จจริงที่ว่าแกนเตาที่ได้รับการดัดแปลงในกรณีแบบ NCCS นั้น ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส (โดยเฉพาะที่ส่วนล่าง) ทำให้

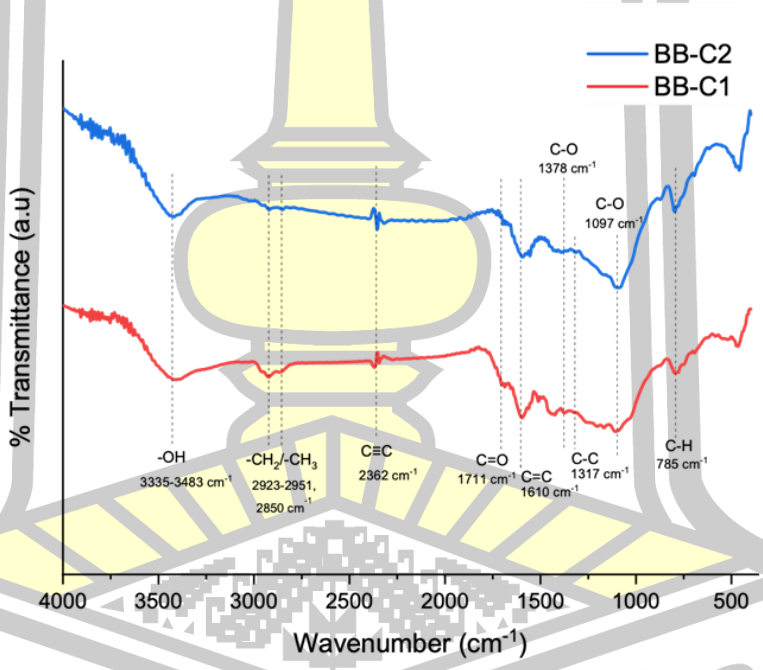
ความร้อนเพียงพอที่จะเปลี่ยนไม้ไผ่ทั้งหมดในเตาและน้ำมันดินเกาะในถ่านให้เป็นถ่านและก๊าซเชื้อเพลิง (Ojolo et al., 2013) ส่งผลให้แกนเตาแบบ NCCS มีค่า %PG เพิ่มและแต่มี แต่ลด %BC (ถ่านเบาขึ้น) เมื่อเปรียบเทียบกับแกนเตาแบบ ECCS

4.5 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared, FTIR) (ภาพที่ 4.8) แสดงให้เห็นถึงสารประกอบต่าง ๆ ในถ่านชีวภาพ ซึ่งอุณหภูมิไพโรไลซิสมีผลกระทบอย่างอย่างมากต่อหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในถ่านชีวภาพ โดยเส้นสเปกตรัม BB-C1 (สีแดง) ในภาพ เป็นเส้นสเปกตรัมของถ่านชีวภาพจากกรณีแกนเตาแบบ ECCS และส่วนเส้น BB-C2 (สีน้ำเงิน) คือเส้นสเปกตรัมของถ่านชีวภาพจากกรณีแกนเตาแบบ NCCS จุดยอดหลายตำแหน่งบนเส้นสเปกตรัมของถ่านชีวภาพทั้งกรณีแกนเตา BB-C1 และแกนเตา BB-C2 หายไปในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส (เริ่มต้นจากอุณหภูมิ 200°C) เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสได้ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฮมิเซลลูโลสในไม้ไผ่ ดังที่แสดงโดยแถบสเปกตรัมที่เลขคลื่น 3335-3483 cm^{-1} (การสั่นแบบยืดหดในฟังก์ชัน O–H ของ ลิกนิน, เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส), 1,711 cm^{-1} (การสั่นแบบยืดหดในฟังก์ชัน C=O ของลิกนิน) และ 1,610 cm^{-1} (การสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตรในฟังก์ชัน C=C ของลิกนิน) ซึ่งเกิดจาก H_2O และ CO_2 ในส่วนของการดูดกลืนที่มีค่าสูงสุดพบที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 1,378 cm^{-1} (การยืดในฟังก์ชัน CO ของเฮมิเซลลูโลส) ซึ่งบ่งชี้ถึงอีเทอร์ที่มีอยู่ในถ่านชีวภาพ การดูดกลืนที่เลขคลื่น 785 cm^{-1} อาจเกิดจากการดัดงอของอะตอม C-H ในกลุ่มโพลีไซคลิกหรือหมู่อะโรมาติกที่ถูกแทนที่ (Zhao et al., 2019) โดยที่ 350°C นั้น ยอดสเปกตรัมการดูดกลืนทั้งหมดแสดงรูปแบบที่เพิ่มขึ้น ควบคู่ไปกับการสลายของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน โดยในส่วนของแถบดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 2362 cm^{-1} (C≡C การยืดหดแบบอสมมาตรของเฮมิเซลลูโลส), 2850 cm^{-1} (การสั่นสะเทือนแบบยืด CH_2 สำหรับหมู่อะลิฟาติก CH_3 และ CH_2) และ 2923 cm^{-1} (CO และ CH_4) นั้น เกิดขึ้นโดย CO และ CH_4 ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการสลายพันธะของ C-O และ C=O

การส่องผ่านที่เลขคลื่น 1317 cm^{-1} เกิดจากการปรากฏของอะโรเมติกส์และการยืดหดของหมู่ฟังก์ชัน C-C ควบคู่กับ (เอสเทอร์และฟีนอล) (Abdullah et al., 2020; Grover et al., 2002; Armynah et al., 2018) และการส่องผ่านที่เลขคลื่น 1,097 cm^{-1} เกิดจากการยืดของหมู่ฟังก์ชัน C-O แบบสมมาตรและการดัดงอของหมู่ฟังก์ชัน C-OH ของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน

(Armynah et al., 2019) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการผลิตถ่านชีวภาพส่งผลต่อการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน และสารระเหยที่ปล่อยออกมาจากถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไพโรไลซิส (Enders et al., 2012; Crombie et al., 2013) โดยสารนั้นประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันการยืดหดหรือดัดงอของ C-C และ C-H ซึ่งพบได้ทั่วไปในสายพันธุ์ย่อยของไม้ไผ่แต่ละสายพันธุ์ เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงถึง 600 °C ค่าการดูดซับของ CO_2 เกือบจะถึงค่าสูงสุด (ที่ระยะการสลายตัวของลิกนิน) ในขณะสารอื่นมีค่าการดูดซับลดลง ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสได้เสร็จสิ้นลง (Zhao et al., 2019). ในกรณีของเส้น BB-C2 แถบสเปกตรัมที่ 2923–2951, 2850, 2362, 1711, 1610 และ 1378 cm^{-1} ลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงสุดของกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าแกนเตาแบบ NCCS ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ซึ่งช่วยทำให้สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวในถ่านชีวภาพสูงขึ้น (Sahoo et al., 2021)



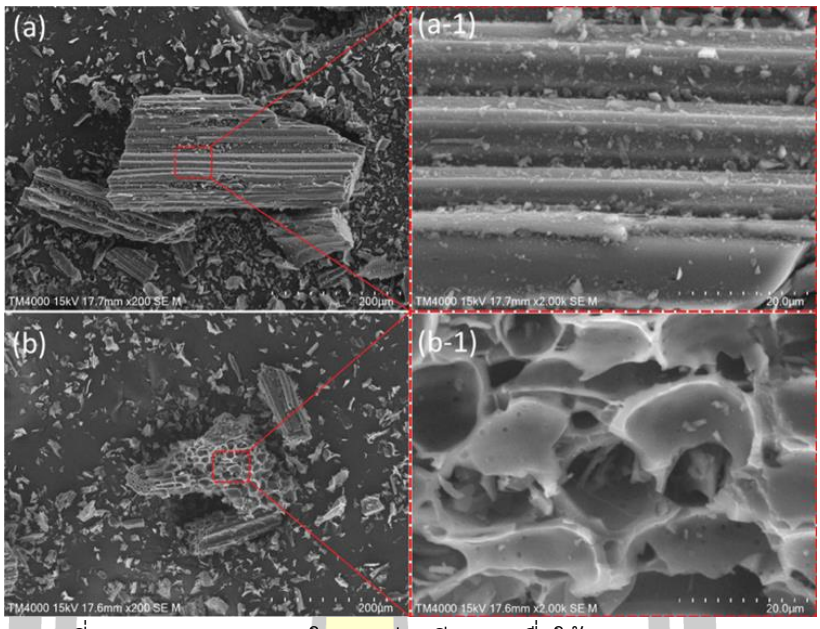
ภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ของเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS (เส้นสีน้ำเงิน) และแบบ ECCS (เส้นสีแดง)

4.5 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมี

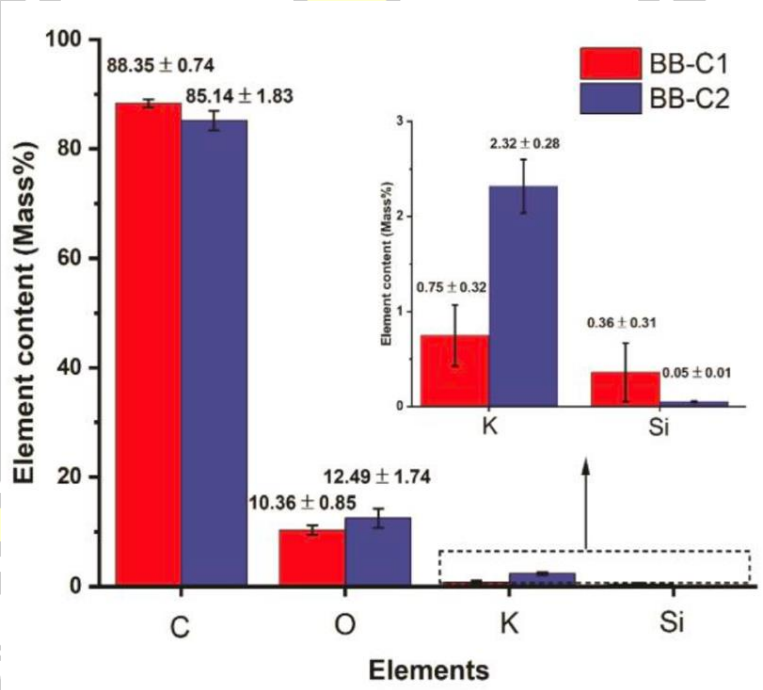
ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของถ่านชีวภาพจากเตาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS ได้แสดงในภาพที่ 4.9 โดยจาก

ภาพเห็นได้ว่า ถ่าน BB-C2 ซึ่งได้จากการใช้แกนเตาแบบ NCCS มีพื้นผิวด้านนอกข่อนข้างเรียบ (ภาพที่ 4.9(a) และ (a-1)) เนื่องจากมีความผันผวนของอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่อัตราการให้ความร้อนต่ำนั้นเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสของเตา (Ong et al., 2021; Zhang et al., 2020) ซึ่งความร้อนมีแนวโน้มที่จะถ่ายโอนผ่านในทิศทางตามแนวยาวมากกว่าไปในทิศทางรัศมีของชิ้นไม้ไผ่ (Kalderis et al., 2023; Pinisakul et al., 2023) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้พื้นผิวและปริมาตรของรูพรุนของถ่านชีวภาพสูงขึ้น (Binh et al., 2022; Hettithanthri et al., 2023; Faraji et al., 2023) แต่ทั้งนี้ผนังของรูพรุนบางลงเนื่องจาก การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ (รูปที่ 4.9b และ 4.9(b-1)) โดยขนาดของรูพรุนพบว่ามีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งหมายความว่าขนาดรูพรุนอยู่ในระดับมาโครพอร์ (Chen et al., 2023) ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผาของกรณี NCCS นอกจากนี้ โดยอ้างอิงตามกับ Yang และคณะ (2016), Viglaová และคณะ (2018) และ Ji และคณะ (2022) ทำให้กล่าวได้ว่า ขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ได้จากกรณีแกนเตาแบบ NCCS นั้นอยู่ในช่วงของไมโครพอร์และมาโครพอร์ ซึ่งบ่งชี้ได้ว่ามีความสมเหมาะสำหรับการใช้งานในการดูดซับสาร (Xu et al., 2017)

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่าน BB-C2 และถ่านชีวภาพ BB-C1 ซึ่งได้จากเตาที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) พบว่ามีธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ซิลิคอน และโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งถ่าน BB-C2 มีปริมาณโพแทศเซียมสูงกว่า BB-C1ดังที่แสดงในภาพที่ 4.10 โดยไม่ปรากฏในส่วนของธาตุไนโตรเจนในกราฟในทั้งสองกรณี เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสนั้นยาวนานเพียงที่ทำให้เกิดการสลายตัวของไนโตรเจน (Armynah et al., 2019) จากกราฟแสดงให้เห็นว่าถ่านไบโอชาร์ที่ผลิตโดยเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร โดยใช้แกนเตาแบบ NCCS มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดดินมากกว่าถ่านไบโอชาร์ที่ผลิตโดยกรณี ECCS เนื่องด้วยมีปริมาณโพแทสเซียมที่โดดเด่นกว่า (Oram et al., 2014; Wang et al., 2561).



ภาพที่ 28 แสดงรูพรุนภายในของถ่านชีวภาพเมื่อใช้แกนเตาแบบ NCCS



ภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุจากรังสีเอ็กซ์ (EDS)

ตารางที่ 9 ข้อมูลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านชีวภาพไม้ไผ่

ตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (%)	สารอินทรีย์ระเหยง่าย VOC (%)	เถ้า (%)	คาร์บอนคงตัว (%)
ถ่านชีวภาพ BB-C1	4.1 ± 0.21	36.4 ± 5.75	10.1 ± 3.87	49.5 ± 9.3
ถ่านชีวภาพ BB-C2	4.0 ± 0.45	9.5 ± 0.75	12.3 ± 3.53	74.2 ± 3.6
ท่อนไม้ไผ่	9.4 ± 0.11	76.0 ± 0.76	1.5 ± 0.13	13.1 ± 0.7

4.6 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis)

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร ผลการทดสอบพบว่าท่อนไม้ไผ่แห้งมีความเหมาะสมต่อการทดลอง โดยมีความชื้น 9.4 ± 0.11% ส่วนของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compound, VOC) ที่มีอยู่ในท่อนไม้ไผ่คือ 76.0 ± 0.76% เถ้า (ash) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ที่พบในการทดสอบคือ 1.5 ± 0.13% และ 13.1 ± 0.7% ตามลำดับ ถ่านชีวภาพที่ได้จากการใช้แกนเตาแบบ NCCS (BB-C2) มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 74.2 ± 3.6% ซึ่งสูงกว่าถ่านชีวภาพที่จากการใช้แกนเตาแบบ ECCS (BB-C1) ประมาณ 50% การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านชีวภาพแสดงว่าแกนตัวแบบ NCCS ช่วยทำให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพของคาร์บอนคงตัวในถ่านชีวภาพที่ได้รับจากเตา (Ogawa et al., 2006; Yablonovitch และ Deckman, 2023) นอกจากนี้ ส่วนของสารอินทรีย์ระเหยง่าย 9.5 ± 0.75% ในถ่านชีวภาพ BB-C2 ซึ่งต่ำกว่าในถ่านชีวภาพ BB-C1 บ่งชี้ว่าการใช้แกนเตาแบบ NCCS แทน ECCS ในเตาเผาถ่านชีวมวลขนาด 50 ลิตรนั้น สามารถทำให้ความบริสุทธิ์ของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นจากการผลิตโดยใช้แกนเตาแบบเดิมได้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการพัฒนาแกนเตาสำหรับเตาเผาถ่านชีวภาพแก๊สซิไฟเออร์ในระดับครัวเรือนขนาด 50 ลิตร เพื่อการผลิตถ่านชีวภาพและก๊าซชีวภาพเพื่อใช้งานในระดับครัวเรือน มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ที่มีอยู่ในประเทศไทย ซึ่งมีการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่องระหว่างกระบวนการจุดเตา และหลงเหลือชิ้นไม้ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการเผาไหม้ รวมทั้งปัญหาการปนเปื้อนน้ำมันดินของผลิตภัณฑ์ถ่าน โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบแกนเตาใหม่ที่มีรูปทรงแกนของแกนเตาไม่สม่ำเสมอ (NCCS) เพื่อให้อากาศไหลเวียนระหว่างการเผาไหม้ได้ดีขึ้น รวมทั้งเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณส่วนล่าง และเพิ่มความจุของไม้เชื้อเพลิงสำหรับการจุดเตา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ที่ใช้แกนเตาที่ได้รับการออกแบบใหม่นี้สามารถทำให้การผลิตถ่านของเตาเกิดขึ้นได้ดีกว่าการใช้แกนเตารูปแบบเดิม เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศในแกนเตาแบบ NCCS มีค่าสูงขึ้น ทำให้แก้ปัญหาเรื่องความยุ่งยากในการจุดเตาที่ผู้ใช้ต้องดูแลอยู่ตลอดลงไปได้ นอกจากนี้ยังแกนเตาลักษณะดังกล่าวยังช่วยทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการไพโรไลซิสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา (โดยเฉพาะส่วนล่างของเตา) สูงกว่า 500°C ซึ่งส่งผลให้มีการกำจัดน้ำมันดินไม่ให้ตกค้างบนถ่านชีวภาพ และสามารถทำให้ไม่ไผ่สามารถเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมด ผลการวิเคราะห์คุณภาพของถ่านชีวภาพที่ได้ แสดงให้เห็นว่าถ่านที่ได้จากเตาเผาที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS นั้นมีขนาดรูพรุนอยู่ในระดับไมโครพอร์และมาโครพอร์และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่าถ่านที่ได้จากเตาเผาที่ใช้แกนเตารูปแบบเดิม นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ต่ำกว่าด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าว่าความบริสุทธิ์ของถ่านชีวภาพที่ได้รับจากเตาเผาถ่านที่ใช้แกนเตาแบบ NCCS สูงกว่าเตาเผาถ่านที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS

แม้ว่าการศึกษาจะแสดงให้เห็นว่าแกนเตาแบบ NCCS จะช่วยให้เตาเผาถ่านชีวภาพสามารถผลิตถ่านที่มีคุณภาพได้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษายังมีข้อจำกัดในส่วนของประเภทของไม้ที่นำมาผลิตถ่าน ขนาด และช่วงความชื้นของไม้ไผ่ที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ จึงควรมีการการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดและความชื้นของไม้ไผ่ในช่วงอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไป ตลอดจนการใช้ไม้เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ และเนื่องจากวิธีทดสอบแบบการต้มน้ำ (water boiling test) ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผาถ่านชีวภาพรูปแบบดังกล่าว ที่ผลิตทั้งถ่านและให้ก๊าซเพื่อหุง

ต้มในครัวเรือนได้ด้วย ดังนั้น วิธีการในการตรวจสอบประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับเตาเผาถ่านชีวภาพจึงเป็นประเด็นหนึ่งที่ต้องได้รับการพัฒนาต่อไปด้วยเช่นกัน

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

Abdullah, A., Ahmed, A., Akhter, P., Razzaq, A., Zafar, M., Hussain, M., Shahzad, N., Majeed, K., Khurrum, S., Bakar, M. S. A., & Park, Y.-K. (2020). Bioenergy potential and thermochemical characterization of lignocellulosic biomass residues available in Pakistan. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *37*(11), 1899–1906. https://doi.org/10.1007/s11814-020-0624-0

Abdullah, N., Mohd Taib, R., Mohamad Aziz, N. S., Omar, M. R., & Md Disa, N. (2023). Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process. *Heliyon*, *9*(1), e12940. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12940

Adeniyi, A. G., Adeyanju, C. A., Iwuozor, K. O., Odeyemi, S. O., Emenike, E. C., Ogunniyi, S., & Te-Erebe, D. K. (2023). Retort carbonization of bamboo (Bambusa vulgaris) waste for thermal energy recovery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *25*(3), 937–947. https://doi.org/10.1007/s10098-022-02415-w

Ajieh, M. U., Owamah, H. I., Edomwonyi-Otu, L. C., Ajieh, G. I., Aduba, P., Owebor, K., & Ikpeseni, S. C. (2023). Characteristics of fuelwood perturbation and effects on carbon monoxide and particulate pollutants emission from cookstoves in Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, *72*, 151–161. https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.008

Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *42*(8), 1619–1640. https://doi.org/10.1021/ie0207919

Armynah, B., Atika, Djafar, Z., Piarah, W. H., & Tahir, D. (2018). Analysis of Chemical and Physical Properties of Biochar from Rice Husk Biomass. *Journal of Physics: Conference Series*, *979*, 012038. https://doi.org/10.1088/1742-6596/979/1/012038

Baldoni, N., Francioni, M., Trozzo, L., Toderi, M., Fornasier, F., D'Ottavio, P., Corti, G., & Cocco, S. (2023). Effect of wood gasification biochar on soil physicochemical properties and enzyme activities, and on crop yield in a wheat-production system with sub-alkaline soil. *Biomass and Bioenergy*, *176*, 106914. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106914

Balmuk, G., Videgain, M., Manyà, J. J., Duman, G., & Yanik, J. (2023). Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *169*, 105858. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105858

Basinas, P., Rusín, J., Chamrádová, K., & Kaldis, S. P. (2023). Pyrolysis of the anaerobic digestion solid by-product: Characterization of digestate decomposition and screening of the biochar use as soil amendment and as additive in anaerobic digestion. *Energy Conversion and Management*, *277*, 116658. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116658

Binh, Q. A., Nguyen, V.-H., & Kajitvichyanukul, P. (2022). Influence of pyrolysis conditions of modified corn cob bio-waste sorbents on adsorption mechanism of atrazine in contaminated water. *Environmental Technology & Innovation*, *26*, 102381. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102381

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

Chaiyaphorn Maneekhat, Tipapon Khamdaeng, Numpon Panyoyai, Thanasit Wongsiriamnuay, & Pracha Yeunyongkul. (2022). Thermal Characteristics of Anila-type Biochar Kiln and Factors Affecting Biochar Production. *RMUTL Engineering Journal*, *7*, 9Jan. https://doi.org/10.14456/RMUTLENGJ.2022.7

Chen, B., Gu, Z., Wu, M., Ma, Z., Lim, H. R., Khoo, K. S., & Show, P. L. (2022). Advancement pathway of biochar resources from macroalgae biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, *167*, 106650. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106650

Chen, L., Cheng, P., Ye, L., Chen, H., Xu, X., & Zhu, L. (2020). Biological performance and fouling mitigation in the biochar-amended anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating pharmaceutical wastewater. *Bioresource Technology*, *302*, 122805. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122805

Chen, W., Gan, L., & Huang, J. (2023). Design, Manufacturing and Functions of Pore-Structured Materials: From Biomimetics to Artificial. *Biomimetics*, *8*(2), 140. https://doi.org/10.3390/biomimetics8020140

Chen, X., Zhang, J., Lin, Q., Li, G., & Zhao, X. (2023). Dispose of Chinese cabbage waste via hydrothermal carbonization: Hydrochar characterization and its potential as a soil

amendment. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(2), 4592–4602. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22359-4

Chen, Y.-X., Huang, X.-D., Han, Z.-Y., Huang, X., Hu, B., Shi, D.-Z., & Wu, W.-X. (2010). Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere*, *78*(9), 1177–1181. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.029

Crombie, K., & Mašek, O. (2015). Pyrolysis biochar systems, balance between bioenergy and carbon sequestration. *GCB Bioenergy*, *7*(2), 349–361. https://doi.org/10.1111/gcbb.12137

Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S. P., Brownsort, P., & Cross, A. (2013). The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy*, *5*(2), 122–131. https://doi.org/10.1111/gcbb.12030

Elkhlifi, Z., Iftikhar, J., Sarraf, M., Ali, B., Saleem, M. H., Ibranshahib, I., Bispo, M. D., Meili, L., Ercisli, S., Torun Kayabasi, E., Alemzadeh Ansari, N., Hegedűsová, A., & Chen, Z. (2023). Potential Role of Biochar on Capturing Soil Nutrients, Carbon Sequestration and Managing Environmental Challenges: A Review. *Sustainability*, *15*(3), 2527. https://doi.org/10.3390/su15032527

Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, *114*, 644–653. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022

Faraji, M., & Saidi, M. (2023). Experimental and simulation study of peanut shell-derived activated carbon and syngas production via integrated pyrolysis-gasification technique. *Process Safety and Environmental Protection*, *171*, 874–887. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.052

Fatima, B., Bibi, F., Ishtiaq Ali, M., Woods, J., Ahmad, M., Mubashir, M., Shariq Khan, M., Bokhari, A., & Khoo, K. S. (2022). Accompanying effects of sewage sludge and pine needle biochar with selected organic additives on the soil and plant variables. *Waste Management*, *153*, 197–208. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.016

Gabhane, J. W., Bhange, V. P., Patil, P. D., Bankar, S. T., & Kumar, S. (2020). Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health conditioner: A review. *SN Applied Sciences*, *2*(7), 1307. https://doi.org/10.1007/s42452-020-3121-5

Guo, S., Li, Y., Wang, Y., Wang, L., Sun, Y., & Liu, L. (2022). Recent advances in biochar-based adsorbents for CO2 capture. *Carbon Capture Science & Technology*, *4*, 100059. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100059

Ibitoye, S. E., Mahamood, R. M., Jen, T.-C., & Akinlabi, E. T. (2022). Combustion, Physical, and Mechanical Characterization of Composites Fuel Briquettes from Carbonized Banana Stalk and Corncob. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*(2), 435–447. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41290

Idris, S. S., Zailan, M. I., Azron, N., & Abd Rahman, N. (2021). Sustainable Green Charcoal Briquette from Food Waste via Microwave Pyrolysis Technique: Influence of Type and Concentration of Binders on Chemical and Physical Characteristics. *International Journal of Renewable Energy Development*, *10*(3), 425–433. https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33101

Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, *2*(4), 421–438. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x

Isukuru, E. J., Ogunkeyede, A. O., Adebayo, A. A., & Uruejoma, M. F. (2023). Potentials of bamboo and its ecological benefits in Nigeria. *Advances in Bamboo Science*, *4*, 100032. https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2023.100032

Ji, Y., Zhang, C., Zhang, X. J., Xie, P. F., Wu, C., & Jiang, L. (2022). A high adsorption capacity bamboo biochar for CO2 capture for low temperature heat utilization. *Separation and Purification Technology*, *293*, 121131. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121131

Khaledi, S., Delbari, M., Galavi, H., Bagheri, H., & Chari, M. M. (2023). Effects of biochar particle size, biochar application rate, and moisture content on thermal properties of an unsaturated sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, *226*, 105579. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105579

Klüpfel, L., Keiluweit, M., Kleber, M., & Sander, M. (2014). Redox Properties of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar). *Environmental Science & Technology*, *48*(10), 5601–5611. https://doi.org/10.1021/es500906d

Kongnine, D. M., Kpelou, P., Attah, N., Kombate, S., Mouzou, E., Djeteli, G., & Napo, K. (2020). Energy Resource of Charcoals Derived from Some Tropical Fruits Nuts Shells. *International Journal of Renewable Energy Development*, *9*(1), 29–35. https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.29-35

Kumar, S., Rawat, D., Singh, B., & Khanduri, V. P. (2023). Utilization of bamboo resources and their market value in the western Himalayan region of India. *Advances in Bamboo Science*, *3*, 100019. https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2023.100019

Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Liang, X., Goh, H. H., Gikas, P., Chong, K.-K., & Chew, K. W. (2023). Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *Journal of Environmental Management*, *332*, 117429. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429

Laidy Hernandez-Mena, Arai Pecora, & Antonio Beraldo. (2014). Slow pyrolysis of bamboo biomass: Analysis of biochar properties. *Chemical Engineering Transactions*, *37*, 115–120. https://doi.org/10.3303/CET1437020

Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K. S., Yang, W., Park, Y.-K., Jung, J., & Hyun, S. (2013). Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, *148*, 196–201. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.135

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (0 ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203762264

Li, L., Long, A., Fossum, B., & Kaiser, M. (2023). Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: A meta-analysis. *Soil Use and Management*, *39*(1), 43–52. https://doi.org/10.1111/sum.12848

Liu, Z., Wang, Z., Chen, H., Cai, T., & Liu, Z. (2021). Hydrochar and pyrochar for sorption of pollutants in wastewater and exhaust gas: A critical review. *Environmental Pollution*, *268*, 115910. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115910

Mosisa, F. T., Tibba, G. S., & Bayisa, B. (2019). BIOCHAR PRODUCTION USING PYROLYSIS COOK STOVE FROM COFFEE HUSK, WOOD WORKING WASTES AND WASTES FROM

BEDELE BREWERY. *International Journal of Multidisciplinary Educational Research*, *5*(3), 178–187.

Muzyka, R., Misztal, E., Hrabak, J., Banks, S. W., & Sajdak, M. (2023). Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. *Energy*, *263*, 126128. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126128

Nachenius, R. W., Ronsse, F., Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2013). Biomass Pyrolysis. In *Advances in Chemical Engineering* (Vol. 42, pp. 75–139). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386505-2.00002-X

Nair, R. R., Kißling, P. A., Marchanka, A., Lecinski, J., Turcios, A. E., Shamsuyeva, M., Rajendiran, N., Ganesan, S., Srinivasan, S. V., Papenbrock, J., & Weichgrebe, D. (2023a). Biochar synthesis from mineral and ash-rich waste biomass, part 2: Characterization of biochar and co-pyrolysis mechanism for carbon sequestration. *Sustainable Environment Research*, *33*(1), 14. https://doi.org/10.1186/s42834-023-00176-9

Nair, R. R., Kißling, P. A., Marchanka, A., Lecinski, J., Turcios, A. E., Shamsuyeva, M., Rajendiran, N., Ganesan, S., Srinivasan, S. V., Papenbrock, J., & Weichgrebe, D. (2023b). Biochar synthesis from mineral and ash-rich waste biomass, part 2: Characterization of biochar and co-pyrolysis mechanism for carbon sequestration. *Sustainable Environment Research*, *33*(1), 14. https://doi.org/10.1186/s42834-023-00176-9

Ong, H. C., Yu, K. L., Chen, W.-H., Pillejera, M. K., Bi, X., Tran, K.-Q., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021). Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *152*, 111698. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111698

Onokwai, A. O., Okokpujie, I. P., Ajisegiri, E. S., Oki, M., Adeoyeb, A. O., & Akinlabi, E. T. (2022). Characterization of Lignocellulosic Biomass Samples in Omu-Aran Metropolis, Kwara State, Nigeria, as Potential Fuel for Pyrolysis Yields. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*(4), 973–981. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.45549

Oram, N. J., Van De Voorde, T. F. J., Ouwehand, G.-J., Bezemer, T. M., Mommer, L., Jeffery, S., & Groenigen, J. W. V. (2014). Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *191*, 92–98. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.031

Panyoyai, N., Petchaihan, L., Wongsiriamnuay, T., Hiransatitporn, B., & Khamdaeng, T. (2019). *Simulation of Temperature Distribution in Biochar Kiln with Different Feedstock Types*.

Petchaihan, L., Panyoyai, N., Khamdaeng, T., & Wongsiriamnuay, T. (2020). Test of a modified small-scale biochar kiln. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *463*(1), 012004. https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012004

Pinisakul, A., Kruatong, N., Vinitnantharat, S., Wilamas, P., Neamchan, R., Sukkhee, N., Werner, D., & Sanghaisuk, S. (2023). Arsenic, Iron, and Manganese Adsorption in Single and Trinary Heavy Metal Solution Systems by Bamboo-Derived Biochars. *C*, *9*(2), 40. https://doi.org/10.3390/c9020040

Pradana, Y. S., & Prasetya, A. (2017). *Performance evaluation of household pyrolytic stove: Effect of outer air holes condition*. 020069. https://doi.org/10.1063/1.4978142

Prakongkep, N., Gilkes, R. J., Wisawapipat, W., Leksungnoen, P., Kerdchana, C., Inboonchuay, T., Delbos, E., Strachan, L.-J., Ariyasakul, P., Ketdan, C., & Hammecker, C. (2020). Effects of Biochar on Properties of Tropical Sandy Soils Under Organic Agriculture. *Journal of Agricultural Science*, *13*(1), 1. https://doi.org/10.5539/jas.v13n1p1

Qian, S., Zhou, X., Fu, Y., Song, B., Yan, H., Chen, Z., Sun, Q., Ye, H., Qin, L., & Lai, C. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of The Total Environment*, *870*, 162024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162024

Rusch, F., Wastowski, A. D., De Lira, T. S., Moreira, K. C. C. S. R., & De Moraes Lúcio, D. (2023). Description of the component properties of species of bamboo: A review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(3), 2487–2495. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01359-3

Rustamaji, H., Prakoso, T., Rizkiana, J., Devianto, H., Widiatmoko, P., & Guan, G. (2022). Synthesis and Characterization of Hydrochar and Bio-oil from Hydrothermal Carbonization of Sargassum sp. Using Choline Chloride (ChCl) Catalyst. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*(2), 403–412. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.42595

Sahoo, S. S., Vijay, V. K., Chandra, R., & Kumar, H. (2021). Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, *3*, 100101. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101

Sawarkar, A. D., Shrimankar, D. D., Kumar, A., Kumar, A., Singh, E., Singh, L., Kumar, S., & Kumar, R. (2020). Commercial clustering of sustainable bamboo species in India. *Industrial Crops and Products*, *154*, 112693. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112693

Sawarkar, A. D., Shrimankar, D. D., Kumar, M., Kumar, P., & Singh, L. (2023). Bamboos as a cultivated medicinal grass for industries: A systematic review. *Industrial Crops and Products*, *203*, 117210. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117210

Sayed, E. T., Olabi, A. G., Shehata, N., Al Radi, M., Majdy Muhaisen, O., Rodriguez, C., Ali Atieh, M., & Abdelkareem, M. A. (2023). Application of bio-based electrodes in emerging capacitive deionization technology for desalination and wastewater treatment. *Ain Shams Engineering Journal*, *14*(8), 102030. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102030

Selvarajoo, A., Wong, Y. L., Khoo, K. S., Chen, W.-H., & Show, P. L. (2022). Biochar production via pyrolysis of citrus peel fruit waste as a potential usage as solid biofuel. *Chemosphere*, *294*, 133671. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133671

Shackley, S., & Carter, S. (2014). Biochar Stoves: An Innovation Studies Perspective. In E. Sajor, B. Resurrección, & S. Rakshit, *Bio-Innovation and Poverty Alleviation: Case Studies from Asia* (pp. 146–171). SAGE Publications India Pvt Ltd. https://doi.org/10.4135/9789351508038.n7

Shen, Q., & Wu, H. (2023). Rapid pyrolysis of biochar prepared from slow and fast pyrolysis: The effects of particle residence time on char properties. *Proceedings of the Combustion Institute*, *39*(3), 3371–3378. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.119

Sittioad, C., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Tippayawong, N., & Panyoyai, N. (2022). *Temperature distribution and properties of biochar from a two-heating-stage kiln*. 020046. https://doi.org/10.1063/5.0115161

Smebye, A. B., Sparrevik, M., Schmidt, H. P., & Cornelissen, G. (2017). Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods. *Biomass and Bioenergy*, *101*, 35–43. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.001

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *19*(1), 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Viglašová, E., Galamboš, M., Danková, Z., Krivosudský, L., Lengauer, C. L., Hood-Nowotny, R., Soja, G., Rompel, A., Matík, M., & Briančin, J. (2018). Production, characterization and adsorption studies of bamboo-based biochar/montmorillonite composite for nitrate removal. *Waste Management*, *79*, 385–394. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.005

W. Intagun, T. Khamdaeng, P. Prom-Ngarm, & N. Panyoyai. (2018). *Effect of Core Puncture Diameter on Bio-Char Kiln Efficiency*. https://doi.org/10.5281/ZENODO.2021719

Wang, H., Wang, X., Cui, Y., Xue, Z., & Ba, Y. (2018a). Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (Phyllostachys pubescens): Product yield prediction and biochar formation mechanism. *Bioresource Technology*, *263*, 444–449. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.040

Wang, H., Wang, X., Cui, Y., Xue, Z., & Ba, Y. (2018b). Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (Phyllostachys pubescens): Product yield prediction and biochar formation mechanism. *Bioresource Technology*, *263*, 444–449. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.040

Wang, H., Wang, X., Cui, Y., Xue, Z., & Ba, Y. (2018c). Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (Phyllostachys pubescens): Product yield prediction and biochar formation mechanism. *Bioresource Technology*, *263*, 444–449. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.040

Wang, L., Xue, C., Nie, X., Liu, Y., & Chen, F. (2018). Effects of biochar application on soil potassium dynamics and crop uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *181*(5), 635–643. https://doi.org/10.1002/jpln.201700528

Xu, Z., Liu, Y., Chen, H., Yang, M., & Li, H. (2017). Bamboo-like, oxygen-doped carbon tubes with hierarchical pore structure derived from polymer tubes for supercapacitor

applications. *Journal of Materials Science*, *52*(13), 7781–7793. https://doi.org/10.1007/s10853-017-1064-z

Yablonovitch, E., & Deckman, H. W. (2023). Scalable, economical, and stable sequestration of agricultural fixed carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120*(16), e2217695120. https://doi.org/10.1073/pnas.2217695120

Yang, K., Yang, J., Jiang, Y., Wu, W., & Lin, D. (2016). Correlations and adsorption mechanisms of aromatic compounds on a high heat temperature treated bamboo biochar. *Environmental Pollution*, *210*, 57–64. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.004

You, X., Wang, X., Sun, R., Liu, Q., Fang, S., Kong, Q., Zhang, X., Xie, C., Zheng, H., Li, H., & Li, Y. (2023). Hydrochar more effectively mitigated nitrous oxide emissions than pyrochar from a coastal soil of the Yellow River Delta, China. *Science of The Total Environment*, *858*, 159628. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159628

Zahida, R., Waseem, R., Kanth, R. H., Ashaq, H., Parmeet, S., Pir, F. A., Saad, A. A., Lal, S., Tahir, S., & Shahid, B. (2017). Biochar: A tool for mitigating climate change-A review. *Chem Sci Rev Lett*, *6*, 1561–1574.

Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., & Cao, X. (2022). Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *12*(6), 2061–2070. https://doi.org/10.1007/s13399-020-00666-5

Zhao, R., Wang, X., Liu, L., Li, P., & Tian, L. (2019). Slow pyrolysis characteristics of bamboo subfamily evaluated through kinetics and evolved gases analysis. *Bioresource Technology*, *289*, 121674. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121674

Carrier, M., Hugo, T., Gorgens, J., & Knoetze, H. (2011). Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *90*(1), 18–26. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.10.001

Tanongkiat Kiatsiriroat, Kanyaporn Chaiwong, Vorayos, N., & Churat Thararax. (2012). Biochar production from freshwater algae by slow pyrolysis. *2*, *6*, Maejo International Journal of Science and Technology. https://doi.org/10.14456/MIJST.2012.13

Chaiwong, K., Kiatsiriroat, T., Vorayos, N., & Thararax, C. (2013). Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, *56*, 600–606. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.035

Dixit, C. S. B., Paul, P. J., & Mukunda, H. S. (2006). Part I: Experimental studies on a pulverised fuel stove. *Biomass and Bioenergy*, *30*(7), 673–683. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.01.011

Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., & Horie, T. (2009). Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. *Field Crops Research*, *111*(1–2), 81–84. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008

Manoj Kumar, Sachin Kumar, & Tyagi, S. K. (2013). Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 265–285. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.010

O'Laughlin, J., & McElligott, K. (2009). [No title found]. *Forest Policy and Economics*, *11*(7), 535–536. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.07.001

L'Orange, C., DeFoort, M., & Willson, B. (2012). Influence of testing parameters on biomass stove performance and development of an improved testing protocol. *Energy for Sustainable Development*, *16*(1), 3–12. https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.008

Maschio, G., Koufopanos, C., & Lucchesi, A. (1992). Pyrolysis, a promising route for biomass utilization. *Bioresource Technology*, *42*(3), 219–231. https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90025-S

Peng, X., Ye, L. L., Wang, C. H., Zhou, H., & Sun, B. (2011). Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*, *112*(2), 159–166. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.01.002

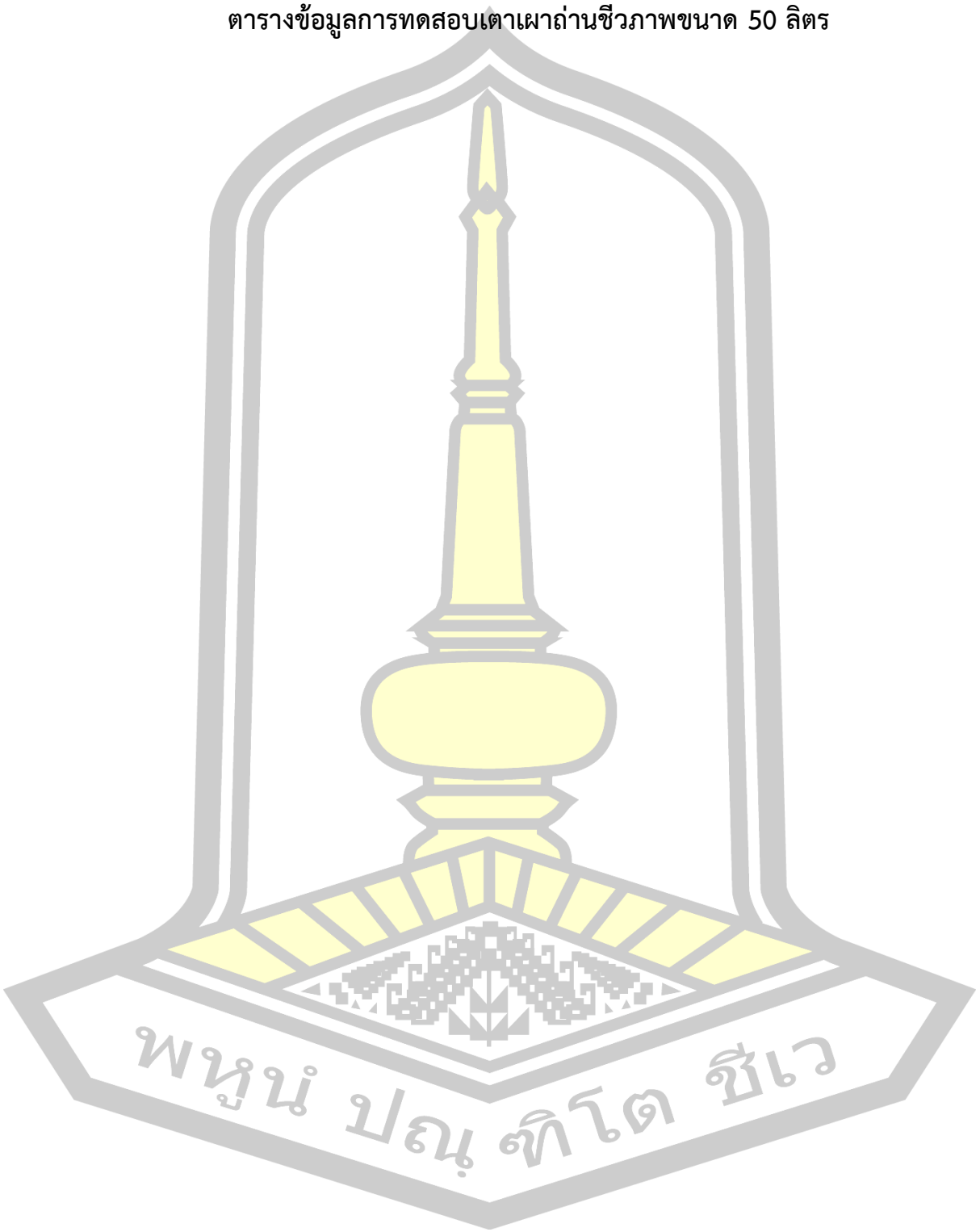
Carter, S., & Shackley, S. (2011). Biochar Stoves: An innovation studies perspective. *UK Biochar Research Centre, University of Edinburgh*.

Torres-Rojas, D., Lehmann, J., Hobbs, P., Joseph, S., & Neufeldt, H. (2011). Biomass availability, energy consumption and biochar production in rural households of Western Kenya. *Biomass and Bioenergy*, *35*(8), 3537–3546. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.002

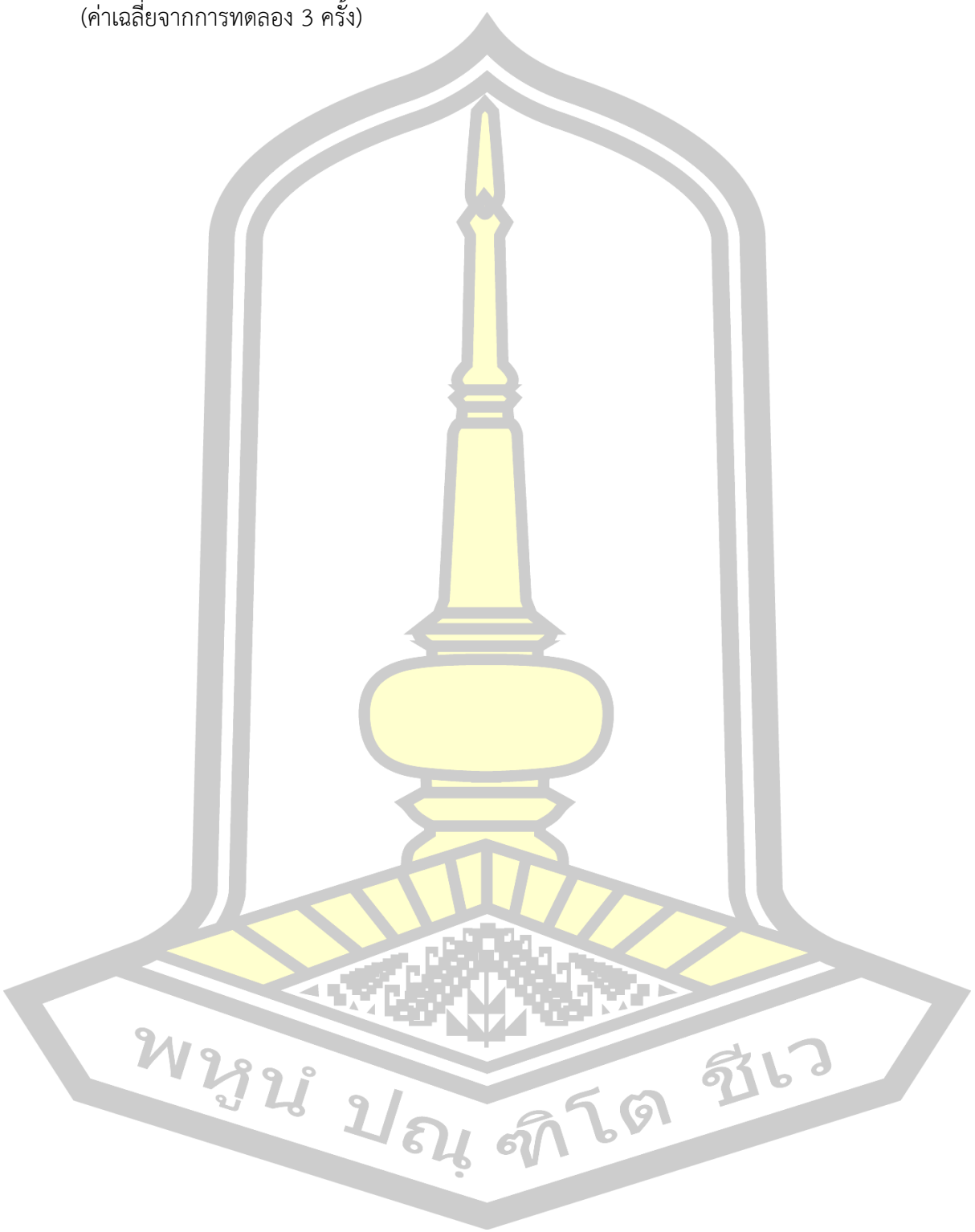
Vitali, F., Parmigiani, S., Vaccari, M., & Collivignarelli, C. (2013). Agricultural waste as household fuel: Techno-economic assessment of a new rice-husk cookstove for developing countries. *Waste Management*, *33*(12), 2762–2770. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.026

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร



ตารางที่ **10** ผลการวัดอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ *NCCS* (ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง)



เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:00:00	32.87	36.90	32.63	76.73
00:00:09	32.83	36.83	32.80	84.83
00:00:19	32.83	36.93	33.07	101.10
00:00:29	32.83	37.10	33.60	121.97
00:00:39	32.83	37.33	34.20	139.33
00:00:49	32.83	37.57	34.93	155.30
00:00:59	32.90	37.77	35.50	171.73
00:01:09	32.80	38.00	36.07	174.50
00:01:19	32.77	38.30	36.83	188.57
00:01:29	32.83	38.57	37.53	205.43
00:01:39	32.83	38.63	38.33	210.00
00:01:49	32.83	38.67	38.93	197.03
00:01:59	32.87	38.63	39.70	189.43
00:02:09	32.87	38.50	40.33	174.77
00:02:19	32.87	38.43	40.83	156.20
00:02:29	32.90	38.47	41.27	152.80
00:02:39	32.93	39.23	41.73	144.40
00:02:49	33.00	39.50	42.27	133.50
00:02:59	32.97	39.57	42.73	126.47
00:03:09	33.00	39.80	43.17	132.10
00:03:19	33.00	39.93	43.53	125.10
00:03:29	32.97	40.20	44.00	131.47
00:03:39	33.03	40.37	44.47	160.00
00:03:49	33.03	40.47	44.97	191.17
00:03:59	33.03	40.57	45.53	206.07
00:04:09	33.07	40.70	46.13	213.07
00:04:19	33.10	40.83	46.77	211.57
00:04:29	33.03	41.03	47.53	215.10
00:04:39	33.03	41.33	48.53	214.83
00:04:49	33.07	41.57	49.47	201.53
00:04:59	33.13	41.83	50.53	209.33
00:05:09	33.17	42.17	51.77	207.30
00:05:19	33.20	42.53	52.80	202.63
00:05:29	33.23	43.23	54.17	193.67
00:05:39	33.27	43.57	55.37	205.13
00:05:49	33.33	44.07	56.67	263.97
00:05:59	33.40	44.63	57.83	344.87
00:06:09	33.47	44.97	58.87	362.37

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:06:19	33.50	45.60	60.00	367.97
00:06:29	33.57	50.33	61.10	389.07
00:06:39	33.70	57.60	62.27	406.60
00:06:49	33.83	68.47	63.70	418.90
00:06:59	34.03	55.83	65.33	423.53
00:07:09	34.23	57.40	67.23	424.87
00:07:19	34.47	62.43	69.33	433.33
00:07:29	34.73	63.20	71.40	439.27
00:07:39	35.00	64.37	73.63	436.57
00:07:49	35.23	53.67	75.73	425.17
00:07:59	35.53	54.80	78.33	394.13
00:08:09	35.87	56.23	80.83	386.33
00:08:19	36.33	57.03	83.33	411.00
00:08:29	36.90	57.73	85.97	416.60
00:08:39	37.83	59.77	88.70	431.43
00:08:49	38.80	59.73	90.97	427.07
00:08:59	39.60	60.57	93.53	419.43
00:09:09	40.50	61.10	95.87	408.37
00:09:19	41.43	62.43	98.23	414.80
00:09:29	42.20	63.53	100.53	403.93
00:09:39	43.07	64.33	103.03	397.83
00:09:49	43.83	64.79	105.20	423.57
00:09:59	44.53	65.38	107.93	428.47
00:10:09	45.20	65.86	110.37	430.33
00:10:19	45.67	66.25	112.70	430.33
00:10:29	46.00	66.87	114.90	439.93
00:10:39	46.37	67.50	116.93	443.27
00:10:49	46.67	68.16	119.07	447.60
00:10:59	46.97	68.75	120.83	441.63
00:11:09	47.27	69.31	122.43	444.10
00:11:19	47.57	69.80	124.33	428.27
00:11:29	47.87	67.63	125.73	415.07
00:11:39	48.20	65.35	126.13	394.77
00:11:49	48.73	63.01	127.47	397.17
00:11:59	49.20	61.99	128.73	390.33
00:12:09	49.77	61.07	133.13	381.83
00:12:19	50.27	61.50	135.13	384.20
00:12:29	50.77	62.17	136.80	403.17

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:12:39	51.20	62.60	138.13	418.70
00:12:49	51.73	63.23	138.93	427.30
00:12:59	52.17	64.00	140.93	430.47
00:13:09	52.60	64.77	142.83	428.73
00:13:19	52.97	65.33	144.50	429.67
00:13:29	53.23	65.93	146.37	431.10
00:13:39	46.13	60.93	143.93	426.50
00:13:49	46.17	62.47	147.37	426.50
00:13:59	46.20	62.03	149.90	417.33
00:14:09	46.17	62.33	150.93	420.80
00:14:19	46.10	62.87	153.90	420.17
00:14:29	46.10	63.90	155.97	417.87
00:14:39	46.13	64.63	157.67	417.40
00:14:49	46.13	65.47	159.23	417.90
00:14:59	46.07	65.90	160.77	403.77
00:15:09	46.10	66.40	162.07	400.20
00:15:19	46.03	66.97	162.77	393.43
00:15:29	46.00	69.63	163.97	385.10
00:15:39	45.97	69.60	163.87	413.97
00:15:49	45.90	71.23	162.70	447.33
00:15:59	45.87	71.53	164.97	512.07
00:16:09	45.77	72.90	166.40	550.10
00:16:19	45.70	72.90	167.60	560.80
00:16:29	45.67	74.33	168.93	557.10
00:16:39	45.63	75.83	172.57	560.83
00:16:49	45.57	77.60	173.80	559.33
00:16:59	45.57	80.80	174.83	553.70
00:17:09	45.53	81.67	175.70	561.57
00:17:19	45.47	83.87	176.50	577.90
00:17:29	45.50	84.57	173.57	558.60
00:17:39	45.43	85.80	177.97	545.30
00:17:49	45.37	85.97	178.60	541.60
00:17:59	45.33	87.27	178.00	538.83
00:18:09	45.27	88.13	180.00	536.17
00:18:19	45.17	89.53	180.27	526.57
00:18:29	45.13	90.83	180.43	529.93
00:18:39	45.17	92.60	178.43	527.13
00:18:49	45.10	94.30	181.27	526.90

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:18:59	45.10	95.50	181.87	532.83
00:19:09	45.07	98.77	182.23	531.27
00:19:19	45.03	100.17	183.10	536.83
00:19:29	44.97	101.77	184.13	533.07
00:19:39	45.00	103.57	185.53	585.27
00:19:49	44.97	105.70	186.20	592.93
00:19:59	44.93	107.43	186.87	615.77
00:20:09	44.93	109.80	188.43	622.17
00:20:19	44.90	112.27	189.63	604.53
00:20:29	44.93	114.43	190.43	587.13
00:20:39	44.90	116.77	191.10	571.83
00:20:49	44.90	118.77	192.53	577.53
00:20:59	44.93	121.10	195.03	577.73
00:21:09	44.97	121.33	196.20	597.37
00:21:19	44.97	122.87	197.03	601.77
00:21:29	45.07	125.13	197.43	597.53
00:21:39	45.10	127.07	198.53	587.07
00:21:49	45.10	129.00	200.23	576.73
00:21:59	45.13	131.03	193.93	593.07
00:22:09	45.13	133.03	195.27	620.50
00:22:19	45.27	134.93	196.63	624.53
00:22:29	45.37	136.33	198.20	644.63
00:22:39	45.40	137.97	199.90	650.40
00:22:49	45.50	138.80	201.53	626.23
00:22:59	45.63	140.33	203.27	625.90
00:23:09	45.70	141.57	204.60	637.33
00:23:19	45.80	143.20	206.13	618.87
00:23:29	45.87	144.67	207.77	602.13
00:23:39	46.00	145.73	209.70	593.93
00:23:49	46.07	146.83	210.80	607.77
00:23:59	46.13	148.00	212.17	622.10
00:24:09	46.23	149.33	213.53	635.93
00:24:19	46.37	151.40	215.10	624.90
00:24:29	46.50	153.37	216.67	602.70
00:24:39	46.63	155.13	217.73	586.60
00:24:49	46.77	156.97	218.73	590.70
00:24:59	47.10	159.17	219.83	610.03
00:25:09	47.47	160.90	220.97	623.67

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:25:19	47.87	162.83	222.27	621.77
00:25:29	48.43	164.53	223.33	630.07
00:25:39	49.03	165.73	224.57	620.47
00:25:49	49.93	167.53	226.00	608.63
00:25:59	51.03	169.53	227.37	598.60
00:26:09	51.97	171.23	228.70	604.07
00:26:19	53.13	172.87	229.80	610.97
00:26:29	54.30	174.23	230.93	612.57
00:26:39	55.23	175.53	231.87	617.37
00:26:49	56.43	176.50	232.47	629.03
00:26:59	57.50	177.10	233.00	641.10
00:27:09	58.77	178.43	233.63	630.10
00:27:19	59.93	179.83	234.30	641.60
00:27:29	61.03	181.83	235.00	658.83
00:27:39	62.20	183.57	235.83	658.23
00:27:49	63.13	184.70	236.57	621.07
00:27:59	64.30	186.97	237.40	600.13
00:28:09	65.33	189.47	238.23	587.10
00:28:19	66.47	192.40	239.27	568.77
00:28:29	67.70	194.67	240.30	586.33
00:28:39	68.77	196.60	241.23	596.37
00:28:49	69.90	198.80	242.20	595.77
00:28:59	70.83	200.73	243.23	629.43
00:29:09	71.70	203.10	244.27	649.83
00:29:19	72.57	205.33	245.03	661.60
00:29:29	73.40	207.03	246.07	662.43
00:29:39	74.17	209.20	247.10	655.80
00:29:49	74.97	211.40	248.17	652.83
00:29:59	75.80	213.33	249.10	647.23
00:30:09	76.50	214.53	250.37	635.67
00:30:19	77.17	216.57	251.37	642.03
00:30:29	77.77	218.90	252.50	640.10
00:30:39	78.33	220.80	253.37	646.07
00:30:49	78.90	222.43	254.00	635.30
00:30:59	79.40	223.63	254.80	634.73
00:31:09	79.77	224.47	255.60	638.23
00:31:19	80.13	225.53	256.33	634.90
00:31:29	80.43	226.57	256.80	635.33

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:31:39	80.77	228.53	257.43	631.70
00:31:49	81.13	230.53	257.83	619.80
00:31:59	81.40	231.77	258.47	610.53
00:32:09	81.67	232.63	259.00	612.20
00:32:19	81.93	232.80	259.43	616.33
00:32:29	82.20	233.30	259.90	635.03
00:32:39	82.43	234.13	260.63	644.20
00:32:49	82.67	235.13	261.33	632.27
00:32:59	82.90	235.83	262.23	637.00
00:33:09	83.13	236.77	263.13	651.30
00:33:19	83.33	237.63	263.83	665.17
00:33:29	83.57	238.43	264.60	671.53
00:33:39	83.83	238.60	265.27	668.97
00:33:49	84.03	239.20	266.33	650.17
00:33:59	84.30	239.80	267.73	637.30
00:34:09	84.53	240.27	269.27	625.67
00:34:19	84.63	240.63	270.87	620.80
00:34:29	84.83	240.77	272.40	610.53
00:34:39	84.90	241.27	273.77	613.57
00:34:49	85.07	241.93	275.13	615.70
00:34:59	85.27	242.47	275.47	608.33
00:35:09	85.37	242.93	276.60	606.47
00:35:19	85.47	243.20	277.53	607.20
00:35:29	85.63	243.40	278.67	601.80
00:35:39	85.80	243.57	279.67	607.03
00:35:49	85.97	243.57	280.37	613.77
00:35:59	86.13	243.63	281.53	617.33
00:36:09	86.30	243.53	282.67	614.47
00:36:19	86.50	243.50	283.87	598.57
00:36:29	86.77	243.53	283.70	588.07
00:36:39	87.10	243.57	284.20	580.30
00:36:49	87.43	243.70	284.60	564.87
00:36:59	87.90	244.10	285.00	563.60
00:37:09	88.33	244.47	285.10	563.53
00:37:19	88.87	244.67	285.17	569.03
00:37:29	89.47	244.70	284.30	565.70
00:37:39	90.00	244.47	284.23	560.10
00:37:49	90.60	243.80	283.93	549.53

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:37:59	91.17	243.47	283.43	552.60
00:38:09	91.60	242.97	282.40	557.47
00:38:19	92.13	242.40	282.43	563.90
00:38:29	92.67	242.03	282.40	569.37
00:38:39	93.20	241.83	282.20	571.03
00:38:49	93.73	242.10	282.13	571.10
00:38:59	94.17	242.10	282.17	576.70
00:39:09	94.67	241.77	282.13	578.47
00:39:19	95.10	241.73	282.00	583.10
00:39:29	95.57	241.87	281.77	595.37
00:39:39	96.00	242.17	281.70	603.80
00:39:49	96.23	241.90	281.53	611.07
00:39:59	96.47	241.67	281.40	598.93
00:40:09	96.60	242.00	281.20	603.77
00:40:19	96.77	242.47	280.87	609.07
00:40:29	96.97	242.77	280.47	602.70
00:40:39	97.07	243.13	280.03	593.43
00:40:49	97.20	243.67	279.53	583.57
00:40:59	97.30	244.23	279.30	565.27
00:41:09	97.40	244.77	278.83	562.13
00:41:19	97.40	245.17	278.37	558.20
00:41:29	97.47	245.73	277.83	547.67
00:41:39	97.57	246.23	277.23	539.60
00:41:49	97.60	246.63	276.60	538.80
00:41:59	97.60	246.90	275.83	539.73
00:42:09	97.63	247.93	275.17	541.67
00:42:19	97.70	249.47	274.50	543.80
00:42:29	97.80	250.50	274.07	544.17
00:42:39	97.87	251.87	273.57	542.77
00:42:49	98.03	253.20	272.80	537.40
00:42:59	98.17	254.67	272.53	532.63
00:43:09	98.20	255.40	272.03	535.43
00:43:19	98.30	256.63	271.00	536.80
00:43:29	98.47	257.13	270.57	533.40
00:43:39	98.80	257.73	270.23	532.50
00:43:49	99.20	258.60	269.97	530.23
00:43:59	99.90	259.57	269.67	533.70
00:44:09	101.20	260.77	269.47	534.63

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:44:19	102.63	261.80	269.27	535.60
00:44:29	104.20	263.03	269.17	529.13
00:44:39	105.37	263.77	268.97	524.93
00:44:49	106.57	264.37	268.77	527.97
00:44:59	107.60	265.13	268.57	524.77
00:45:09	108.50	266.43	268.53	517.23
00:45:19	109.43	268.33	268.13	518.83
00:45:29	110.30	268.63	267.70	521.17
00:45:39	111.07	268.93	267.23	519.63
00:45:49	111.87	269.47	266.93	521.13
00:45:59	112.57	271.03	266.57	523.33
00:46:09	113.27	273.23	266.07	520.63
00:46:19	114.17	275.07	265.63	514.53
00:46:29	115.23	276.47	265.27	512.27
00:46:39	116.53	277.67	265.07	514.37
00:46:49	117.70	279.03	264.73	519.60
00:46:59	118.93	279.73	264.53	525.93
00:47:09	119.97	280.37	264.30	546.97
00:47:19	121.07	281.83	264.30	566.23
00:47:29	121.97	283.03	264.63	579.37
00:47:39	122.73	284.40	265.17	584.37
00:47:49	123.47	285.83	266.00	592.00
00:47:59	124.23	287.43	266.80	593.90
00:48:09	125.37	288.80	267.93	588.77
00:48:19	126.67	290.13	268.83	577.93
00:48:29	127.93	291.30	269.70	570.10
00:48:39	128.97	292.73	270.67	567.90
00:48:49	129.97	293.90	271.60	565.77
00:48:59	131.07	294.90	272.70	565.20
00:49:09	132.13	295.57	273.67	563.87
00:49:19	133.30	296.47	274.80	565.53
00:49:29	134.10	297.40	275.83	566.17
00:49:39	134.67	297.60	276.83	570.27
00:49:49	135.13	297.63	277.50	565.07
00:49:59	135.63	298.40	278.40	568.17
00:50:09	136.03	299.73	279.33	570.60
00:50:19	136.30	301.53	280.20	574.30
00:50:29	136.43	302.73	281.47	571.83

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:50:39	136.47	304.13	282.57	569.23
00:50:49	136.53	304.87	283.33	567.57
00:50:59	136.80	305.40	284.33	564.53
00:51:09	137.33	307.97	285.03	562.07
00:51:19	137.93	308.53	285.53	558.90
00:51:29	138.70	309.00	286.03	552.47
00:51:39	139.53	309.07	286.70	546.77
00:51:49	140.67	309.00	287.20	544.50
00:51:59	141.57	309.33	287.80	548.60
00:52:09	142.23	310.37	288.60	548.07
00:52:19	142.73	312.73	289.20	556.70
00:52:29	143.37	314.17	289.77	604.17
00:52:39	144.30	316.20	290.93	627.97
00:52:49	145.27	318.43	292.10	635.37
00:52:59	146.47	320.73	293.23	634.53
00:53:09	147.67	322.53	294.43	634.97
00:53:19	148.73	324.87	295.83	635.20
00:53:29	149.83	327.43	297.33	639.80
00:53:39	150.67	329.03	299.33	642.23
00:53:49	151.60	331.77	301.50	643.80
00:53:59	152.47	334.53	303.63	650.63
00:54:09	153.27	336.37	306.07	648.60
00:54:19	154.10	337.47	308.17	641.93
00:54:29	154.87	338.07	310.50	645.67
00:54:39	155.73	339.03	312.50	649.37
00:54:49	156.53	341.23	314.13	650.23
00:54:59	157.77	344.63	315.53	654.80
00:55:09	158.80	347.83	317.50	660.27
00:55:19	159.50	350.17	320.20	662.70
00:55:29	160.30	352.90	322.27	668.53
00:55:39	161.20	355.93	323.97	671.60
00:55:49	162.70	359.43	326.67	678.50
00:55:59	164.63	361.23	328.93	686.47
00:56:09	166.80	362.90	331.13	689.50
00:56:19	169.13	368.33	332.63	687.77
00:56:29	170.93	372.30	334.57	690.93
00:56:39	173.67	374.67	336.80	694.83
00:56:49	177.27	374.67	339.13	697.83

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
00:56:59	180.90	375.27	341.67	700.30
00:57:09	183.67	377.33	344.47	702.07
00:57:19	185.10	379.97	346.30	703.03
00:57:29	186.77	383.70	347.87	703.17
00:57:39	188.57	386.60	349.47	714.83
00:57:49	189.67	389.10	350.53	719.27
00:57:59	189.90	391.40	352.87	723.07
00:58:09	189.53	393.77	355.20	720.73
00:58:19	189.00	397.77	359.50	717.40
00:58:29	189.37	399.87	363.70	712.53
00:58:39	189.93	403.97	367.33	705.33
00:58:49	190.70	405.77	370.90	689.93
00:58:59	191.93	408.33	375.17	688.10
00:59:09	193.37	411.57	378.77	691.17
00:59:19	194.20	412.80	381.63	689.40
00:59:29	194.17	416.30	385.27	678.43
00:59:39	194.27	421.63	386.70	672.33
00:59:49	194.43	425.43	390.27	673.47
00:59:59	194.57	428.23	391.40	672.50
01:00:09	195.07	430.77	391.30	670.70
01:00:19	195.93	433.90	392.27	668.53
01:00:29	197.47	437.67	394.87	665.37
01:00:39	199.20	440.13	397.50	666.83
01:00:49	201.37	441.80	401.37	670.30
01:00:59	203.67	442.57	404.53	668.10
01:01:09	205.47	445.13	406.27	666.37
01:01:19	207.27	447.47	407.43	663.40
01:01:29	209.10	448.57	409.37	664.47
01:01:39	211.10	449.73	411.03	668.67
01:01:49	212.93	450.17	411.13	668.87
01:01:59	214.23	449.53	411.47	665.43
01:02:09	215.53	450.53	414.70	666.10
01:02:19	216.60	452.03	420.63	666.07
01:02:29	217.83	450.07	423.63	661.03
01:02:39	218.33	449.10	426.07	657.17
01:02:49	219.37	449.47	429.37	661.77
01:02:59	220.57	449.90	430.43	667.90
01:03:09	221.77	451.17	430.07	671.47

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:03:19	222.97	452.87	429.83	672.50
01:03:29	224.23	453.93	431.50	672.97
01:03:39	225.40	455.00	431.50	672.40
01:03:49	226.80	455.40	432.17	672.80
01:03:59	228.43	455.17	432.03	672.70
01:04:09	230.33	455.57	432.80	673.57
01:04:19	232.40	456.17	434.80	673.13
01:04:29	234.27	456.90	436.53	673.27
01:04:39	236.07	457.53	436.77	674.37
01:04:49	238.00	457.70	437.57	674.53
01:04:59	240.27	458.40	439.73	673.47
01:05:09	242.33	460.97	441.43	676.93
01:05:19	243.93	463.63	442.23	675.73
01:05:29	245.47	465.23	443.17	673.23
01:05:39	247.23	466.47	444.63	670.97
01:05:49	249.50	469.37	445.40	669.93
01:05:59	252.07	472.57	444.00	669.33
01:06:09	254.93	476.47	442.80	673.13
01:06:19	256.90	480.27	443.03	671.67
01:06:29	257.70	482.03	443.93	673.67
01:06:39	258.33	484.50	443.97	673.97
01:06:49	259.70	487.10	443.60	674.87
01:06:59	260.83	489.83	443.50	676.67
01:07:09	262.17	492.67	444.67	677.67
01:07:19	263.27	494.57	444.50	678.07
01:07:29	264.17	495.17	444.10	680.70
01:07:39	265.63	497.03	444.40	683.70
01:07:49	267.20	499.83	444.07	683.17
01:07:59	269.33	500.93	443.53	685.10
01:08:09	272.00	503.03	444.10	685.93
01:08:19	275.67	504.63	446.83	688.07
01:08:29	279.67	506.60	450.23	691.73
01:08:39	282.90	508.97	451.67	691.67
01:08:49	286.63	511.87	452.17	692.03
01:08:59	289.07	515.30	454.13	692.67
01:09:09	290.10	518.67	456.47	693.80
01:09:19	290.53	520.97	458.40	695.93
01:09:29	290.83	522.63	459.70	698.33

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:09:39	291.33	524.53	462.10	698.87
01:09:49	292.47	527.57	464.17	701.03
01:09:59	293.77	530.43	466.27	703.03
01:10:09	295.03	532.07	467.73	706.57
01:10:19	296.60	533.53	469.53	709.20
01:10:29	298.40	534.77	470.73	713.93
01:10:39	299.87	536.13	472.57	715.83
01:10:49	302.93	539.00	474.33	714.17
01:10:59	306.30	541.37	475.53	715.23
01:11:09	308.83	542.80	475.17	717.13
01:11:19	311.67	544.63	475.20	716.53
01:11:29	314.03	545.57	475.10	714.77
01:11:39	316.93	546.63	476.13	715.37
01:11:49	320.07	547.97	475.90	715.03
01:11:59	322.20	550.17	476.80	713.57
01:12:09	324.37	553.97	478.80	714.23
01:12:19	326.40	555.67	479.87	715.33
01:12:29	328.50	556.33	479.03	715.80
01:12:39	330.83	556.97	479.33	715.67
01:12:49	333.10	558.40	479.10	714.37
01:12:59	335.50	560.20	478.93	714.43
01:13:09	338.63	561.43	478.70	715.43
01:13:19	341.70	559.93	478.17	714.47
01:13:29	344.13	556.23	479.23	710.57
01:13:39	345.40	559.67	480.53	709.77
01:13:49	346.80	560.07	481.00	706.60
01:13:59	348.57	555.87	484.00	708.60
01:14:09	349.87	555.47	484.87	710.30
01:14:19	350.77	555.27	485.30	709.87
01:14:29	351.50	556.97	484.87	709.03
01:14:39	353.00	559.70	485.03	710.27
01:14:49	355.90	559.87	485.37	709.83
01:14:59	358.27	563.17	484.40	712.93
01:15:09	360.33	566.13	483.73	714.57
01:15:19	360.90	570.03	485.03	714.83
01:15:29	361.90	572.50	485.27	715.17
01:15:39	364.53	575.93	485.70	716.17
01:15:49	365.40	578.17	487.87	717.03

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:15:59	364.97	577.03	489.30	715.20
01:16:09	365.30	581.00	489.80	718.20
01:16:19	367.10	583.53	488.00	718.77
01:16:29	369.53	584.60	488.07	717.93
01:16:39	371.43	584.70	486.93	717.17
01:16:49	372.13	584.03	486.43	719.33
01:16:59	373.13	584.97	487.10	716.17
01:17:09	374.27	586.67	489.60	714.30
01:17:19	375.83	589.50	491.40	716.43
01:17:29	378.67	590.27	492.27	717.07
01:17:39	382.87	590.40	491.30	718.13
01:17:49	386.33	592.00	489.77	721.40
01:17:59	389.57	594.17	489.50	720.80
01:18:09	391.83	595.37	490.27	723.13
01:18:19	392.33	597.87	491.17	722.80
01:18:29	396.33	597.93	491.43	724.57
01:18:39	400.07	595.90	491.17	721.60
01:18:49	404.17	595.93	491.40	718.10
01:18:59	406.07	598.33	491.57	718.53
01:19:09	406.97	599.37	491.03	721.33
01:19:19	409.80	600.23	492.63	722.63
01:19:29	415.00	600.60	493.33	724.30
01:19:39	419.30	600.93	494.70	726.47
01:19:49	422.07	603.70	495.43	727.23
01:19:59	424.83	604.47	498.57	730.50
01:20:09	425.87	609.33	499.37	734.33
01:20:19	427.07	613.80	501.37	735.37
01:20:29	428.20	617.73	504.83	737.17
01:20:39	429.17	620.90	508.03	738.53
01:20:49	431.13	624.53	507.90	740.03
01:20:59	433.73	626.87	509.67	740.10
01:21:09	436.03	631.17	508.70	740.20
01:21:19	438.67	634.00	508.43	742.23
01:21:29	442.47	634.40	509.70	741.50
01:21:39	447.90	635.53	510.40	742.27
01:21:49	451.00	636.97	510.57	745.53
01:21:59	453.27	638.43	510.30	746.90
01:22:09	455.83	641.33	511.50	748.27

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:22:19	458.97	647.47	513.33	747.80
01:22:29	463.70	644.53	514.97	748.87
01:22:39	467.60	641.93	516.57	751.03
01:22:49	470.60	646.83	518.40	753.00
01:22:59	474.50	649.10	521.70	756.67
01:23:09	476.00	650.30	522.97	753.93
01:23:19	476.10	653.07	523.37	754.30
01:23:29	477.80	655.70	524.50	755.40
01:23:39	478.70	657.53	525.50	756.07
01:23:49	479.90	661.23	525.53	756.27
01:23:59	483.67	665.20	529.27	758.60
01:24:09	487.77	668.30	533.47	764.00
01:24:19	491.77	671.10	535.07	769.70
01:24:29	494.70	672.23	533.83	773.20
01:24:39	497.80	674.90	538.43	773.93
01:24:49	499.67	678.93	540.67	775.93
01:24:59	500.33	682.93	543.27	779.00
01:25:09	500.17	685.83	544.40	783.10
01:25:19	501.07	689.90	545.70	784.00
01:25:29	502.83	693.20	546.23	782.63
01:25:39	505.63	695.33	548.37	785.13
01:25:49	510.17	697.57	548.70	790.20
01:25:59	513.23	699.27	548.87	791.93
01:26:09	517.23	700.80	550.30	794.77
01:26:19	521.97	702.73	552.57	799.57
01:26:29	526.80	705.40	555.10	804.80
01:26:39	532.63	708.93	556.43	807.13
01:26:49	537.07	711.03	556.07	808.23
01:26:59	539.33	711.27	558.23	807.77
01:27:09	542.93	713.37	558.53	810.83
01:27:19	546.07	715.87	561.80	815.93
01:27:29	548.47	719.53	564.00	820.63
01:27:39	550.80	723.70	567.63	825.17
01:27:49	554.13	728.23	572.13	828.30
01:27:59	557.90	732.20	573.83	833.73
01:28:09	560.57	735.47	575.00	837.10
01:28:19	562.10	736.80	576.00	840.37
01:28:29	562.63	738.27	577.80	843.97

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:28:39	563.63	740.33	580.97	847.70
01:28:49	566.03	742.67	584.77	852.83
01:28:59	569.43	745.53	587.23	855.83
01:29:09	578.10	748.17	589.30	859.50
01:29:19	583.07	751.17	591.47	862.17
01:29:29	585.37	754.00	592.00	864.53
01:29:39	587.50	756.53	593.43	870.60
01:29:49	589.60	758.83	595.07	876.73
01:29:59	592.37	761.10	596.37	883.53
01:30:09	593.47	763.13	598.73	893.87
01:30:19	593.47	765.47	599.83	909.93
01:30:29	593.20	767.63	602.10	898.90
01:30:39	592.80	769.47	603.43	886.00
01:30:49	592.40	771.00	603.13	882.13
01:30:59	592.03	772.67	603.83	878.17
01:31:09	591.97	773.90	603.73	869.97
01:31:19	591.87	775.10	604.50	871.47
01:31:29	591.80	775.93	604.93	871.47
01:31:39	592.20	776.90	605.17	866.53
01:31:49	593.57	777.57	605.90	860.67
01:31:59	594.10	778.10	605.97	853.40
01:32:09	594.60	778.17	606.50	844.53
01:32:19	594.70	778.07	606.47	838.47
01:32:29	595.27	778.10	606.67	835.17
01:32:39	595.90	777.40	605.87	827.63
01:32:49	596.03	776.80	604.67	820.07
01:32:59	596.13	775.30	602.43	811.87
01:33:09	596.23	768.97	606.80	807.70
01:33:19	596.40	769.50	602.73	803.37
01:33:29	597.50	768.70	599.67	801.20
01:33:39	598.30	767.83	595.90	808.23
01:33:49	599.27	766.37	592.30	794.20
01:33:59	599.67	763.80	588.77	778.80
01:34:09	600.50	761.30	585.60	767.10
01:34:19	600.63	760.27	582.03	755.20
01:34:29	601.17	758.67	579.13	747.67
01:34:39	601.37	755.60	576.03	738.70
01:34:49	601.03	752.83	572.63	732.57

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:34:59	600.90	749.63	569.13	724.13
01:35:09	601.03	747.10	565.47	714.60
01:35:19	602.00	744.97	562.83	706.70
01:35:29	601.97	742.23	558.57	694.30
01:35:39	601.70	739.97	555.63	684.57
01:35:49	601.13	736.63	553.20	672.10
01:35:59	600.40	733.50	549.93	662.77
01:36:09	599.50	730.30	545.80	651.27
01:36:19	598.70	727.07	541.77	644.37
01:36:29	597.87	724.13	539.47	635.07
01:36:39	597.03	715.33	540.27	622.63
01:36:49	596.17	711.37	535.83	613.00
01:36:59	595.27	708.33	530.20	606.50
01:37:09	594.63	708.63	522.53	596.50
01:37:19	593.90	705.57	519.27	587.37
01:37:29	592.83	700.73	514.67	580.77
01:37:39	591.60	696.97	511.03	573.80
01:37:49	590.07	692.53	508.77	563.23
01:37:59	588.53	689.30	505.83	557.27
01:38:09	587.10	685.73	501.43	548.43
01:38:19	585.63	682.30	496.93	543.13
01:38:29	584.03	678.83	492.53	536.50
01:38:39	582.43	675.23	489.57	528.77
01:38:49	580.87	672.13	485.57	522.77
01:38:59	579.17	668.47	482.27	518.33
01:39:09	577.27	665.17	479.07	510.20
01:39:19	575.33	661.73	475.10	504.70
01:39:29	573.93	657.03	473.00	498.53
01:39:39	571.05	654.40	467.93	494.07
01:39:49	568.17	650.60	465.07	489.80
01:39:59	565.31	647.63	461.87	484.53
01:40:09	562.46	643.80	458.37	478.73
01:40:19	559.61	640.47	455.97	474.07
01:40:29	556.78	636.63	453.33	468.70
01:40:39	553.96	633.43	450.80	464.00
01:40:49	551.14	629.03	448.43	459.10
01:40:59	548.34	629.97	441.73	456.63
01:41:09	545.55	627.93	437.93	452.57

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:41:19	542.77	624.80	435.33	448.17
01:41:29	539.99	622.30	431.80	444.13
01:41:39	537.23	619.27	429.03	439.30
01:41:49	534.48	616.60	426.40	435.63
01:41:59	531.73	612.83	423.77	432.53
01:42:09	529.00	609.20	421.53	427.97
01:42:19	526.28	606.57	418.60	425.03
01:42:29	523.57	603.40	416.33	421.23
01:42:39	520.86	600.33	414.10	417.70
01:42:49	518.17	596.97	411.40	413.90
01:42:59	515.49	589.22	408.90	411.43
01:43:09	512.82	586.31	406.13	409.17
01:43:19	510.15	583.41	404.37	405.73
01:43:29	507.50	580.51	402.73	402.83
01:43:39	504.86	577.63	400.73	400.00
01:43:49	502.23	574.77	397.97	396.27
01:43:59	499.60	571.91	395.63	392.50
01:44:09	496.99	569.06	399.13	389.63
01:44:19	494.39	566.22	397.70	385.67
01:44:29	491.80	563.40	397.57	383.03
01:44:39	489.22	560.58	397.23	378.70
01:44:49	486.64	557.78	394.80	376.43
01:44:59	484.08	554.99	392.87	374.10
01:45:09	481.53	552.21	389.67	371.43
01:45:19	478.99	549.44	387.80	368.20
01:45:29	476.46	546.68	386.23	365.03
01:45:39	473.93	543.93	382.73	362.73
01:45:49	471.42	541.20	381.60	360.37
01:45:59	468.92	538.47	380.17	358.17
01:46:09	466.43	535.76	378.33	356.83
01:46:19	463.95	533.05	376.60	354.20
01:46:29	461.48	530.36	374.33	350.87
01:46:39	459.01	527.68	373.40	348.23
01:46:49	456.56	525.01	371.53	345.70
01:46:59	454.12	522.35	368.57	343.53
01:47:09	451.69	519.70	367.03	340.63
01:47:19	449.27	517.06	363.97	338.00
01:47:29	446.86	514.44	359.67	334.83

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:47:39	444.46	511.82	355.53	333.07
01:47:49	442.06	509.22	353.70	330.83
01:47:59	439.68	506.62	352.57	328.43
01:48:09	437.31	504.04	351.37	325.83
01:48:19	434.95	501.47	349.27	323.83
01:48:29	432.60	498.91	346.97	321.77
01:48:39	430.26	496.36	345.63	320.10
01:48:49	427.93	493.82	344.13	317.63
01:48:59	425.61	491.29	342.20	315.03
01:49:09	423.29	488.78	340.23	312.07
01:49:19	420.99	486.27	337.97	309.47
01:49:29	418.70	483.78	336.53	307.30
01:49:39	416.42	481.30	334.73	305.03
01:49:49	414.15	478.82	332.93	303.33
01:49:59	411.89	476.36	331.03	302.03
01:50:09	409.64	473.91	329.20	300.34
01:50:19	407.40	471.47	328.23	297.75
01:50:29	405.17	469.05	326.67	295.18
01:50:39	402.95	466.63	325.43	292.62
01:50:49	400.74	464.22	323.53	290.08
01:50:59	398.53	461.83	322.13	287.56
01:51:09	396.34	459.45	321.17	285.06
01:51:19	394.16	457.07	319.80	282.57
01:51:29	391.99	454.71	318.03	280.10
01:51:39	389.83	452.36	316.90	277.65
01:51:49	387.68	450.02	315.77	275.21
01:51:59	385.54	447.69	314.80	272.80
01:52:09	383.41	445.38	313.47	270.40
01:52:19	381.29	443.07	312.73	268.01
01:52:29	379.18	440.77	311.20	265.64
01:52:39	377.08	438.49	309.70	263.29
01:52:49	374.99	436.22	296.40	260.96
01:52:59	372.91	433.95	295.65	258.65
01:53:09	370.84	431.70	294.85	256.35
01:53:19	368.78	429.46	292.95	254.07
01:53:29	366.73	427.23	291.40	251.80
01:53:39	364.69	425.02	290.10	249.55
01:53:49	362.66	422.81	289.15	247.32

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
01:53:59	360.64	420.61	287.75	245.11
01:54:09	358.63	418.43	287.25	242.91
01:54:19	356.63	416.25	287.60	240.73
01:54:29	354.64	414.09	287.15	238.57
01:54:39	352.66	411.94	286.65	236.43
01:54:49	350.69	409.80	285.55	234.30
01:54:59	348.73	407.67	284.10	232.19
01:55:09	346.78	405.55	282.85	230.09
01:55:19	344.84	403.44	281.25	228.02
01:55:29	342.91	401.35	280.25	225.96
01:55:39	340.99	399.26	279.80	223.92
01:55:49	339.08	397.19	279.20	221.89
01:55:59	337.18	395.12	279.20	219.88
01:56:09	335.29	393.07	279.60	217.89
01:56:19	333.41	391.03	278.80	215.92
01:56:29	331.54	389.00	276.95	213.96
01:56:39	329.68	386.98	276.00	212.02
01:56:49	327.83	384.97	275.15	210.10
01:56:59	326.00	382.97	274.95	208.19
01:57:09	324.17	380.99	274.95	206.30
01:57:19	322.35	379.01	274.15	204.43
01:57:29	320.54	377.05	273.25	202.58
01:57:39	318.74	375.09	272.55	200.74
01:57:49	316.95	373.15	271.85	198.92
01:57:59	315.17	371.22	270.60	197.12
01:58:09	313.40	369.30	269.35	195.33
01:58:19	311.64	367.39	266.65	193.56
01:58:29	309.89	365.49	264.85	191.81
01:58:39	308.15	363.61	264.10	190.07
01:58:49	306.43	361.73	263.10	188.36
01:58:59	304.71	359.87	261.90	186.65
01:59:09	303.00	358.01	260.85	184.97
01:59:19	301.30	356.17	259.40	183.30
01:59:29	299.61	354.34	258.20	181.66
01:59:39	297.93	352.52	257.80	180.02
01:59:49	296.26	350.71	256.35	178.41
01:59:59	294.60	348.91	254.00	176.81
02:00:09	292.96	347.12	252.90	175.23

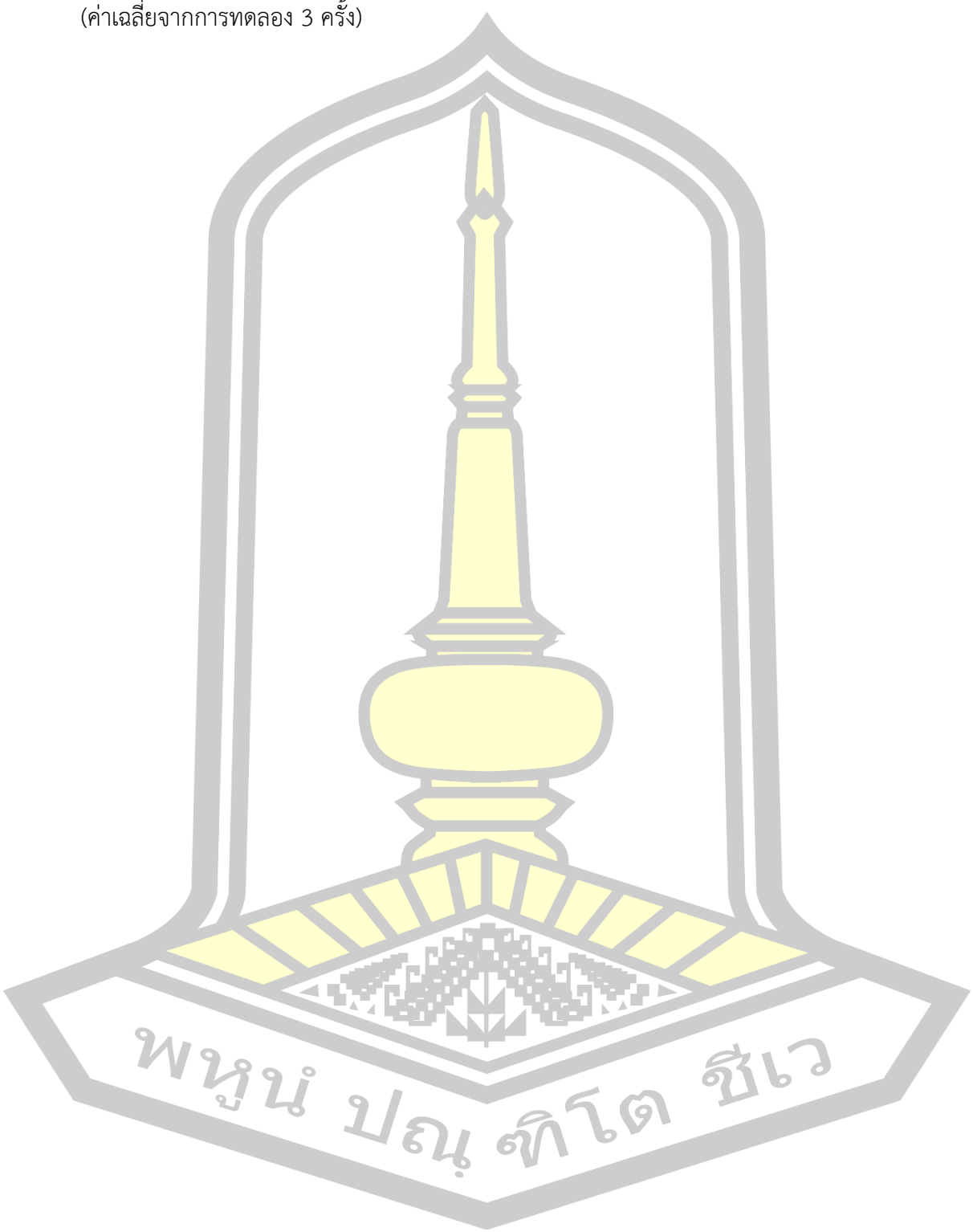
เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
02:00:19	291.32	345.34	251.40	173.66
02:00:29	289.69	343.58	251.30	172.12
02:00:39	288.07	341.82	250.40	170.59
02:00:49	286.46	340.08	248.95	169.07
02:00:59	284.86	338.35	247.40	167.58
02:01:09	283.27	336.63	246.60	166.10
02:01:19	281.70	334.92	245.75	164.64
02:01:29	280.13	333.22	244.20	163.19
02:01:39	278.57	331.53	243.45	161.77
02:01:49	277.02	329.85	243.05	160.36
02:01:59	275.48	328.18	242.65	158.96
02:02:09	273.96	326.53	241.80	157.59
02:02:19	272.44	324.88	241.50	156.23
02:02:29	270.93	323.25	240.60	154.89
02:02:39	269.43	321.63	240.10	153.56
02:02:49	267.94	320.02	239.25	152.25
02:02:59	266.46	318.42	237.70	150.96
02:03:09	265.00	316.83	235.65	149.69
02:03:19	263.54	315.25	234.95	148.43
02:03:29	262.09	313.68	234.55	147.19
02:03:39	260.65	312.13	234.30	145.97
02:03:49	259.23	310.58	234.10	144.76
02:03:59	257.81	309.05	233.95	143.58
02:04:09	256.40	307.53	233.15	142.40
02:04:19	255.00	306.01	231.95	141.25
02:04:29	253.61	304.51	230.95	140.11
02:04:39	252.24	303.02	229.60	138.99
02:04:49	250.87	301.55	228.20	137.89
02:04:59	249.51	300.08	227.40	136.81
02:05:09	248.16	298.62	227.00	135.74
02:05:19	246.83	297.18	225.60	134.68
02:05:29	245.50	295.74	224.60	133.65
02:05:39	244.18	294.32	223.50	132.63
02:05:49	242.88	292.91	223.10	131.63
02:05:59	241.58	291.50	221.70	130.65
02:06:09	240.29	290.11	220.95	129.68
02:06:19	239.01	288.73	220.20	128.73
02:06:29	237.75	287.37	219.00	127.80

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
02:06:39	236.49	286.01	217.95	126.89
02:06:49	235.24	284.66	217.25	125.99
02:06:59	234.00	283.33	216.50	125.11
02:07:09	232.78	282.00	215.70	124.24
02:07:19	231.56	280.69	214.90	123.40
02:07:29	230.35	279.39	213.90	122.57
02:07:39	229.16	278.10	212.85	121.76
02:07:49	227.97	276.82	212.20	120.96
02:07:59	226.79	275.55	211.20	120.18
02:08:09	225.63	274.29	210.55	119.42
02:08:19	224.47	273.04	209.45	118.68
02:08:29	223.32	271.81	208.90	117.95
02:08:39	222.19	270.58	207.75	117.24
02:08:49	221.06	269.37	207.10	116.55
02:08:59	219.94	268.17	206.50	115.87
02:09:09	218.84	266.97	205.80	115.21
02:09:19	217.74	265.79	204.60	114.57
02:09:29	216.65	264.62	203.20	113.95
02:09:39	215.58	263.47	201.90	113.34
02:09:49	214.51	262.32	200.95	112.75
02:09:59	213.45	261.18	199.80	112.18
02:10:09	212.41	260.06	198.95	111.62
02:10:19	211.37	258.94	198.20	111.08
02:10:29	210.35	257.84	197.20	110.56
02:10:39	209.33	256.75	196.50	110.05
02:10:49	208.32	255.66	196.70	109.57
02:10:59	207.33	254.59	196.10	109.10
02:11:09	206.34	253.53	194.85	108.64
02:11:19	205.36	252.49	194.45	108.21
02:11:29	204.40	251.45	193.70	107.79
02:11:39	203.44	250.42	192.95	107.38
02:11:49	202.50	249.41	191.95	107.00
02:11:59	201.56	248.40	191.40	106.63
02:12:09	200.63	247.41	191.15	106.28
02:12:19	199.72	246.43	190.45	105.94
02:12:29	198.81	245.46	189.35	105.63
02:12:39	197.92	244.50	188.75	105.33
02:12:49	197.03	243.55	188.15	105.04

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
02:12:59	196.16	242.61	187.45	104.78
02:13:09	195.29	241.68	187.10	104.53
02:13:19	194.43	240.77	186.95	104.30
02:13:29	193.59	239.86	186.10	104.08
02:13:39	192.75	238.97	185.60	103.89
02:13:49	191.93	238.09	185.15	103.71
02:13:59	191.11	237.21	184.35	103.54
02:14:09	190.31	236.35	184.20	103.40
02:14:19	189.51	234.90	183.40	103.27
02:14:29	188.73	234.15	182.95	103.16
02:14:39	187.95	233.30	182.25	103.06
02:14:49	187.19	232.35	182.05	102.98
02:14:59	186.43	231.55	181.75	102.92
02:15:09	185.68	230.65	181.05	102.88
02:15:19	184.95	229.80	181.00	102.85
02:15:29	184.22	229.10	180.50	102.84
02:15:39	183.51	228.30	180.15	102.85
02:15:49	182.80	227.55	179.65	102.88
02:15:59	182.11	226.80	178.95	102.92
02:16:09	181.42	225.95	178.60	102.98
02:16:19	180.75	225.30	178.25	103.05
02:16:29	180.08	224.40	177.65	103.15
02:16:39	179.43	223.75	177.05	103.26
02:16:49	178.78	222.80	176.60	103.38
02:16:59	178.15	222.05	176.05	103.53
02:17:09	177.52	221.20	175.45	103.69
02:17:19	176.91	220.40	175.20	103.87
02:17:29	176.31	219.70	174.95	104.06
02:17:39	175.71	218.80	174.75	104.27
02:17:49	175.13	218.00	174.30	104.50
02:17:59	174.55	217.15	173.90	104.75
02:18:09	173.99	216.30	173.50	105.01
02:18:19	173.43	215.60	173.35	105.30
02:18:29	172.89	214.80	172.85	105.59
02:18:39	172.35	213.95	172.15	105.91
02:18:49	171.83	213.05	171.35	105.70
02:18:59	171.31	212.20	170.60	105.10
02:19:09	170.81	211.40	170.00	104.60

เวลา	$T_{l,NCCS}$ (°C)	$T_{m,NCCS}$ (°C)	$T_{u,NCCS}$ (°C)	$T_{f,NCCS}$ (°C)
02:19:19	170.32	210.65	169.30	104.35
02:19:29	169.83	209.95	168.80	104.20
02:19:39	169.36	209.25	168.25	103.90
02:19:49	168.89	208.55	167.60	103.65
02:19:59	168.44	207.75	167.00	103.35
02:20:09	168.00	207.10	166.60	102.90
02:20:19	167.56	206.35	166.00	102.45
02:20:29	167.14	205.55	165.00	102.10
02:20:39	166.72	204.90	164.15	101.70
02:20:49	166.32	204.15	163.65	101.15
02:20:59	165.93	203.40	163.10	100.90
02:21:09	165.54	202.70	162.50	100.70
02:21:19	165.17	201.85	161.85	100.60
02:21:29	164.80	201.20	161.45	100.20
02:21:39	164.45	200.40	160.95	99.95
02:21:49	164.11	199.65	160.35	99.40
02:21:59	163.77	198.95	159.75	98.90
02:22:09	163.45	198.10	159.00	98.55
02:22:19	163.14	197.45	158.40	98.50
02:22:29	162.83	196.75	157.95	98.20
02:22:39	162.54	196.05	157.50	97.65
02:22:49	162.25	195.40	157.10	97.00
02:22:59	161.98	194.80	156.85	96.55
02:23:09	161.72	194.25	156.45	96.45
02:23:19	161.46	193.55	155.80	96.35
02:23:29	161.22	192.85	155.35	96.35
02:23:39	160.99	192.25	154.95	96.40
02:23:49	160.76	191.50	154.25	96.20
02:23:59	160.55	191.00	153.75	96.00
02:24:09	160.35	190.35	153.20	95.65
02:24:19	160.15	189.65	152.75	95.25

ตารางที่ **11** ตารางผลการวัดอุณหภูมิเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่ใช้แกนเตาแบบ ECCS (ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง)



เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:00:00	30.17	29.80	30.10	27.90
00:00:09	30.13	29.77	30.27	28.30
00:00:19	30.13	29.80	30.27	28.40
00:00:29	30.13	29.87	30.37	28.60
00:00:39	30.13	29.97	30.60	28.60
00:00:49	30.20	30.07	30.87	28.67
00:00:59	30.20	30.13	31.20	28.67
00:01:09	30.20	30.23	31.67	28.80
00:01:19	30.20	30.37	32.07	28.90
00:01:29	30.20	30.53	32.60	30.60
00:01:39	30.20	30.63	33.13	33.43
00:01:49	30.20	30.73	33.50	68.43
00:01:59	30.20	30.83	33.93	65.57
00:02:09	30.20	30.93	34.40	57.80
00:02:19	30.20	31.07	35.00	55.70
00:02:29	30.20	31.27	35.77	53.63
00:02:39	30.17	31.33	36.43	51.90
00:02:49	30.17	31.50	37.33	50.13
00:02:59	30.17	31.63	38.23	48.10
00:03:09	30.17	31.80	39.33	45.63
00:03:19	30.17	32.13	40.77	51.13
00:03:29	30.17	32.30	41.80	59.50
00:03:39	30.17	32.57	43.13	65.97
00:03:49	30.17	32.63	44.20	73.67
00:03:59	30.17	32.83	45.53	79.67
00:04:09	30.17	33.10	47.27	87.70
00:04:19	30.17	33.37	48.73	104.77
00:04:29	30.17	33.53	50.60	121.57
00:04:39	30.17	33.77	52.20	145.73
00:04:49	30.17	34.10	53.53	162.40
00:04:59	30.17	34.33	54.83	182.30
00:05:09	30.20	34.77	56.30	198.97
00:05:19	30.20	35.17	57.50	213.57
00:05:29	30.23	35.60	58.50	232.43
00:05:39	30.23	35.97	59.67	244.03
00:05:49	30.20	36.40	60.67	247.67
00:05:59	30.20	36.87	62.03	264.67
00:06:09	30.20	37.30	63.10	298.90

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:06:19	30.20	37.80	64.27	331.47
00:06:29	30.20	38.27	65.63	339.03
00:06:39	30.20	38.67	67.03	338.47
00:06:49	30.20	39.13	68.37	342.43
00:06:59	30.20	39.47	69.83	349.07
00:07:09	30.27	39.90	71.07	353.87
00:07:19	30.27	40.33	72.33	355.43
00:07:29	30.30	40.73	73.53	355.50
00:07:39	30.30	41.23	74.80	356.93
00:07:49	30.33	41.60	76.20	366.43
00:07:59	30.33	42.03	77.57	379.17
00:08:09	30.33	42.43	79.10	387.47
00:08:19	30.37	42.83	81.27	388.60
00:08:29	30.37	43.30	83.13	396.43
00:08:39	30.40	43.70	84.97	402.10
00:08:49	30.43	44.17	86.73	401.83
00:08:59	30.43	44.60	88.93	424.40
00:09:09	30.43	45.13	91.20	429.07
00:09:19	30.43	45.73	93.33	425.77
00:09:29	30.53	46.33	96.10	420.27
00:09:39	30.50	47.03	98.80	412.07
00:09:49	30.53	47.87	102.03	404.07
00:09:59	30.57	48.20	105.43	413.43
00:10:09	30.60	48.77	108.77	418.43
00:10:19	30.63	49.57	112.20	432.07
00:10:29	30.63	50.27	115.17	442.03
00:10:39	30.63	51.00	118.23	444.63
00:10:49	30.67	51.63	121.47	445.63
00:10:59	30.67	52.27	124.23	448.47
00:11:09	30.73	52.87	127.23	459.33
00:11:19	30.73	53.23	129.90	465.17
00:11:29	30.80	53.70	132.50	467.23
00:11:39	30.80	54.37	134.90	466.23
00:11:49	30.80	54.50	137.27	466.47
00:11:59	30.83	54.57	139.77	459.10
00:12:09	30.83	55.10	142.50	453.50
00:12:19	30.87	55.83	145.13	454.93
00:12:29	30.87	56.63	147.83	422.87

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:12:39	30.87	57.87	150.50	431.07
00:12:49	30.90	59.40	152.73	450.10
00:12:59	30.93	61.13	155.67	463.43
00:13:09	30.93	63.23	158.10	475.33
00:13:19	30.97	68.07	160.80	475.23
00:13:29	31.00	71.30	163.37	480.17
00:13:39	31.00	74.07	165.97	483.90
00:13:49	31.03	77.23	168.70	483.63
00:13:59	31.07	80.50	170.90	486.07
00:14:09	31.07	83.53	173.17	484.33
00:14:19	31.10	87.17	174.90	474.47
00:14:29	31.17	90.77	176.77	458.43
00:14:39	31.17	94.80	178.63	455.07
00:14:49	31.23	98.87	180.30	452.93
00:14:59	31.23	102.77	181.93	467.33
00:15:09	31.30	106.93	183.90	472.27
00:15:19	31.33	111.07	185.43	482.77
00:15:29	31.37	115.67	187.50	492.33
00:15:39	31.43	119.70	189.40	494.97
00:15:49	31.50	123.27	191.20	495.23
00:15:59	31.57	126.07	193.13	487.67
00:16:09	31.63	127.23	194.37	488.43
00:16:19	31.70	129.63	195.87	478.67
00:16:29	31.73	132.07	196.27	473.37
00:16:39	31.87	134.77	196.60	464.97
00:16:49	31.93	137.63	196.87	452.80
00:16:59	32.00	140.73	197.13	447.70
00:17:09	32.07	143.87	197.50	438.83
00:17:19	32.17	146.83	198.10	436.90
00:17:29	32.27	149.70	198.67	435.57
00:17:39	32.33	152.17	199.07	433.03
00:17:49	32.43	154.73	199.43	426.83
00:17:59	32.57	157.33	199.57	422.13
00:18:09	32.60	159.63	199.80	436.70
00:18:19	32.67	162.03	199.97	443.83
00:18:29	32.73	164.07	200.17	445.07
00:18:39	32.87	166.10	200.77	441.43
00:18:49	32.97	168.23	201.60	441.53

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:18:59	33.13	170.43	202.23	441.33
00:19:09	33.27	172.77	202.77	440.17
00:19:19	33.43	175.00	202.83	433.53
00:19:29	33.60	177.03	202.83	427.87
00:19:39	33.83	179.70	203.10	426.70
00:19:49	33.97	182.43	202.97	436.33
00:19:59	34.13	185.13	202.77	436.93
00:20:09	34.30	187.03	202.80	430.53
00:20:19	34.43	189.07	202.73	422.00
00:20:29	34.60	191.80	202.60	417.27
00:20:39	34.80	193.47	202.50	414.60
00:20:49	34.97	194.70	203.23	404.23
00:20:59	35.17	196.20	203.23	395.60
00:21:09	35.33	197.73	203.07	387.60
00:21:19	35.53	199.07	202.40	383.33
00:21:29	35.73	199.63	201.93	372.37
00:21:39	36.00	199.77	201.07	362.27
00:21:49	36.27	199.77	200.23	359.90
00:21:59	36.43	199.43	199.57	360.67
00:22:09	36.67	199.40	199.03	360.53
00:22:19	36.87	199.80	198.30	360.53
00:22:29	37.10	200.43	197.83	359.17
00:22:39	37.40	201.77	197.67	357.50
00:22:49	37.60	203.03	197.40	382.93
00:22:59	37.97	204.10	197.23	428.70
00:23:09	38.30	205.13	197.20	478.17
00:23:19	38.67	206.57	197.70	502.10
00:23:29	39.07	207.67	198.33	530.20
00:23:39	39.37	208.87	199.40	547.43
00:23:49	39.80	211.10	201.07	553.40
00:23:59	40.23	212.17	202.90	556.23
00:24:09	40.67	213.77	205.17	573.87
00:24:19	41.17	214.43	207.67	597.60
00:24:29	41.83	215.80	210.10	593.97
00:24:39	42.53	218.13	212.60	593.97
00:24:49	43.23	220.23	214.40	598.47
00:24:59	43.93	222.23	216.77	598.17
00:25:09	44.63	224.43	218.37	596.03

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:25:19	45.50	226.43	219.93	595.67
00:25:29	46.40	228.23	221.60	596.33
00:25:39	47.37	230.70	223.07	597.20
00:25:49	48.43	232.63	224.53	583.33
00:25:59	49.67	235.50	226.47	584.10
00:26:09	51.07	238.37	228.03	586.23
00:26:19	52.47	241.20	230.27	596.53
00:26:29	54.00	244.20	232.50	574.37
00:26:39	55.63	246.47	235.43	566.17
00:26:49	57.23	248.73	238.60	558.43
00:26:59	59.00	251.10	241.30	554.43
00:27:09	60.67	252.37	243.53	544.57
00:27:19	62.20	253.23	243.53	543.00
00:27:29	63.80	253.90	243.47	531.77
00:27:39	65.67	254.53	243.00	517.67
00:27:49	67.33	242.23	242.60	503.43
00:27:59	68.80	232.50	242.83	495.37
00:28:09	70.43	238.13	243.20	497.20
00:28:19	71.87	243.97	242.73	499.80
00:28:29	73.17	247.60	242.17	503.37
00:28:39	74.40	251.00	241.30	512.23
00:28:49	75.47	252.37	241.27	515.70
00:28:59	76.40	253.23	241.70	519.70
00:29:09	77.27	253.77	240.87	518.80
00:29:19	78.03	254.47	240.83	515.23
00:29:29	78.80	254.73	240.80	508.03
00:29:39	79.53	254.87	242.23	500.93
00:29:49	80.13	254.83	243.63	488.53
00:29:59	80.67	241.37	246.03	480.50
00:30:09	81.23	235.03	246.07	476.30
00:30:19	81.70	232.63	244.97	456.57
00:30:29	82.23	231.77	243.73	468.57
00:30:39	82.67	231.77	243.20	476.80
00:30:49	83.13	233.47	243.97	485.33
00:30:59	83.53	235.93	243.87	495.97
00:31:09	83.90	237.80	240.93	504.97
00:31:19	84.30	239.27	239.33	511.93
00:31:29	84.63	240.30	238.87	515.83

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:31:39	85.07	241.00	239.87	516.50
00:31:49	85.43	241.50	240.83	517.60
00:31:59	85.77	242.33	241.77	514.40
00:32:09	86.10	243.43	241.53	514.33
00:32:19	86.43	244.30	241.50	511.00
00:32:29	86.77	245.60	241.60	508.50
00:32:39	87.07	247.90	242.57	504.90
00:32:49	87.40	250.27	242.67	503.03
00:32:59	87.77	252.83	242.03	514.93
00:33:09	88.07	255.27	241.87	525.03
00:33:19	88.37	257.53	242.43	527.60
00:33:29	88.73	259.77	243.23	527.70
00:33:39	88.97	261.73	244.67	528.73
00:33:49	89.30	262.93	245.57	520.67
00:33:59	89.70	262.80	245.53	514.03
00:34:09	90.00	261.57	246.27	511.70
00:34:19	90.27	261.40	246.87	508.10
00:34:29	90.57	261.20	247.47	512.37
00:34:39	90.87	261.20	247.90	511.37
00:34:49	91.20	261.37	248.07	507.30
00:34:59	91.50	261.63	248.10	508.17
00:35:09	91.77	261.53	247.97	504.17
00:35:19	92.03	261.27	247.73	500.80
00:35:29	92.23	261.17	246.77	498.70
00:35:39	92.47	261.23	246.23	498.50
00:35:49	92.67	260.50	246.17	496.80
00:35:59	92.87	259.97	246.23	497.80
00:36:09	93.13	258.83	246.50	495.20
00:36:19	93.30	256.07	246.40	492.60
00:36:29	93.53	247.33	245.83	488.07
00:36:39	93.70	247.97	245.20	484.80
00:36:49	93.87	248.27	245.20	482.83
00:36:59	94.03	248.77	245.53	480.50
00:37:09	94.17	249.17	245.80	473.40
00:37:19	94.30	249.30	245.83	467.23
00:37:29	94.47	249.30	245.67	468.47
00:37:39	94.60	247.83	246.07	475.27
00:37:49	94.73	247.27	246.37	477.40

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:37:59	94.87	247.00	246.27	475.27
00:38:09	94.97	246.63	246.40	465.90
00:38:19	95.03	246.00	246.33	450.17
00:38:29	95.10	245.37	246.37	440.43
00:38:39	95.17	245.77	246.30	434.73
00:38:49	95.17	246.40	246.03	427.73
00:38:59	95.13	246.73	245.10	423.33
00:39:09	95.13	248.03	244.47	420.97
00:39:19	95.20	249.20	244.27	422.13
00:39:29	95.17	250.07	244.37	427.07
00:39:39	95.23	250.63	243.60	430.43
00:39:49	95.23	251.40	242.73	435.77
00:39:59	95.30	252.00	241.97	444.80
00:40:09	95.33	252.43	241.57	452.37
00:40:19	95.33	253.07	241.40	452.13
00:40:29	95.40	253.67	241.17	460.40
00:40:39	95.40	254.30	240.87	462.83
00:40:49	95.43	254.73	240.77	480.97
00:40:59	95.43	256.40	240.93	477.23
00:41:09	95.47	255.07	241.00	508.20
00:41:19	95.60	254.87	241.43	585.40
00:41:29	95.77	255.10	242.67	609.53
00:41:39	95.97	255.70	244.40	612.63
00:41:49	96.13	256.60	246.57	603.87
00:41:59	96.30	257.50	248.13	576.37
00:42:09	96.43	258.13	249.83	558.27
00:42:19	96.57	258.43	250.30	550.73
00:42:29	96.63	259.43	250.47	541.07
00:42:39	96.73	258.73	250.33	548.90
00:42:49	96.87	257.70	250.27	563.40
00:42:59	96.93	258.00	250.03	592.90
00:43:09	97.00	258.40	250.07	609.80
00:43:19	97.10	259.50	253.10	631.00
00:43:29	97.17	260.90	256.67	640.87
00:43:39	97.27	262.50	259.37	643.97
00:43:49	97.27	265.33	261.20	646.90
00:43:59	97.27	268.47	260.30	671.80
00:44:09	97.30	270.33	259.37	705.07

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:44:19	97.30	273.13	258.53	720.63
00:44:29	97.30	276.63	260.27	732.27
00:44:39	97.33	282.17	265.17	739.93
00:44:49	97.40	287.73	269.67	744.47
00:44:59	97.37	292.57	272.77	742.80
00:45:09	97.30	297.40	276.37	749.40
00:45:19	97.37	300.13	278.70	744.83
00:45:29	97.37	303.90	281.50	726.60
00:45:39	97.37	310.40	285.13	699.43
00:45:49	97.30	313.17	288.77	702.80
00:45:59	97.40	316.47	291.63	695.30
00:46:09	97.33	318.20	295.63	702.40
00:46:19	97.33	320.63	299.17	714.23
00:46:29	97.37	323.77	303.40	721.27
00:46:39	97.47	324.80	306.20	718.23
00:46:49	97.47	326.47	308.10	711.60
00:46:59	97.47	328.87	309.97	700.43
00:47:09	97.50	330.97	308.77	692.03
00:47:19	97.43	331.93	308.73	685.17
00:47:29	97.43	331.97	308.13	678.20
00:47:39	97.43	332.10	308.10	664.40
00:47:49	97.50	331.67	310.93	645.73
00:47:59	97.50	329.73	313.33	632.50
00:48:09	97.47	327.40	316.73	616.70
00:48:19	97.47	325.00	316.03	601.27
00:48:29	97.47	323.97	311.53	592.13
00:48:39	97.50	321.40	310.10	586.97
00:48:49	97.53	318.93	307.13	572.00
00:48:59	97.57	318.00	305.20	557.47
00:49:09	97.60	316.07	305.03	551.67
00:49:19	97.60	313.67	304.37	548.63
00:49:29	97.67	310.97	303.17	545.20
00:49:39	97.67	308.17	301.17	541.47
00:49:49	97.73	306.03	300.00	541.73
00:49:59	97.73	303.83	299.00	541.77
00:50:09	97.77	301.73	297.83	536.67
00:50:19	97.77	300.20	296.83	523.27
00:50:29	97.83	298.77	294.63	514.50

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:50:39	97.87	297.13	291.80	504.77
00:50:49	97.83	295.33	289.90	504.10
00:50:59	97.87	293.60	287.77	513.67
00:51:09	97.83	292.60	286.40	519.93
00:51:19	97.90	291.50	286.40	535.23
00:51:29	97.93	292.17	286.50	552.17
00:51:39	97.97	292.27	285.07	568.57
00:51:49	97.97	292.63	284.33	588.53
00:51:59	98.00	292.03	284.60	603.17
00:52:09	98.07	292.13	285.57	607.50
00:52:19	98.13	292.37	286.63	607.97
00:52:29	98.10	292.53	287.93	617.23
00:52:39	98.13	293.13	289.13	623.63
00:52:49	98.13	294.03	290.13	621.47
00:52:59	98.17	295.20	291.03	614.60
00:53:09	98.23	295.80	292.53	610.07
00:53:19	98.33	296.73	293.60	610.97
00:53:29	98.30	297.70	294.17	614.10
00:53:39	98.33	300.10	295.20	618.67
00:53:49	98.30	306.97	296.17	618.30
00:53:59	98.30	307.23	296.50	621.97
00:54:09	98.30	306.47	296.93	625.17
00:54:19	98.33	307.83	297.80	628.80
00:54:29	98.33	309.17	297.90	633.33
00:54:39	98.33	314.77	297.93	632.33
00:54:49	98.33	316.07	298.27	637.47
00:54:59	98.30	318.37	299.07	642.40
00:55:09	98.30	319.47	300.20	675.90
00:55:19	98.23	321.37	300.93	699.43
00:55:29	98.13	324.57	302.50	706.70
00:55:39	98.10	325.07	304.40	710.30
00:55:49	98.07	327.70	307.50	716.30
00:55:59	98.03	328.97	310.47	718.93
00:56:09	97.93	331.67	314.77	719.37
00:56:19	97.97	334.13	318.47	719.27
00:56:29	98.00	336.50	322.63	716.47
00:56:39	98.03	340.27	326.47	704.20
00:56:49	98.07	342.33	329.33	673.87

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
00:56:59	98.17	344.23	330.60	665.27
00:57:09	98.20	345.70	329.70	658.67
00:57:19	98.23	348.07	330.63	656.97
00:57:29	98.23	350.00	332.40	662.07
00:57:39	98.37	352.33	334.17	682.93
00:57:49	98.43	356.97	335.47	696.70
00:57:59	98.60	360.70	338.37	700.53
00:58:09	98.70	365.60	341.73	693.93
00:58:19	98.93	370.10	342.83	691.97
00:58:29	99.10	371.40	345.63	690.43
00:58:39	99.37	374.47	346.83	698.97
00:58:49	99.60	379.47	350.50	704.50
00:58:59	99.83	380.73	354.47	709.50
00:59:09	100.20	381.80	357.10	716.83
00:59:19	100.53	385.30	357.33	718.23
00:59:29	100.83	388.80	357.60	722.53
00:59:39	101.27	393.67	358.83	715.63
00:59:49	101.60	395.83	362.17	711.73
00:59:59	101.97	398.27	364.37	713.23
01:00:09	102.20	397.90	364.87	710.23
01:00:19	102.33	401.27	365.10	711.00
01:00:29	102.60	394.80	365.53	704.83
01:00:39	102.70	401.00	363.80	684.47
01:00:49	102.87	400.70	362.77	670.67
01:00:59	103.20	399.00	363.90	631.57
01:01:09	103.37	398.40	363.00	617.67
01:01:19	103.43	397.23	361.97	616.73
01:01:29	103.57	395.97	360.40	609.03
01:01:39	103.67	393.43	358.17	606.70
01:01:49	103.80	391.97	358.40	603.27
01:01:59	103.93	391.50	358.27	603.73
01:02:09	103.97	389.87	356.50	602.30
01:02:19	104.10	388.40	356.70	606.60
01:02:29	104.37	388.03	355.73	622.40
01:02:39	104.67	386.53	355.03	631.17
01:02:49	105.03	385.60	350.03	630.47
01:02:59	105.27	383.77	345.47	640.43
01:03:09	105.50	384.47	342.63	653.90

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:03:19	105.73	383.77	341.27	670.77
01:03:29	105.87	385.27	340.37	675.83
01:03:39	106.03	380.67	341.17	677.60
01:03:49	106.20	375.07	342.47	672.80
01:03:59	106.30	377.70	345.97	655.90
01:04:09	106.43	380.47	347.83	641.67
01:04:19	106.50	382.33	346.00	637.77
01:04:29	106.53	381.27	343.67	648.33
01:04:39	106.63	380.40	342.03	658.67
01:04:49	106.77	377.87	341.10	673.40
01:04:59	106.90	376.40	342.10	692.00
01:05:09	107.13	375.30	343.33	704.73
01:05:19	107.30	374.87	343.83	720.47
01:05:29	107.53	375.57	346.50	730.40
01:05:39	107.70	375.83	347.23	728.77
01:05:49	107.90	376.07	348.20	736.43
01:05:59	108.13	376.57	349.10	738.27
01:06:09	108.33	369.13	351.97	723.73
01:06:19	108.63	379.13	355.03	710.37
01:06:29	108.93	381.00	358.07	707.70
01:06:39	109.20	381.30	361.50	702.67
01:06:49	109.37	372.43	362.83	698.40
01:06:59	109.47	385.33	364.83	699.67
01:07:09	109.67	387.63	366.47	701.57
01:07:19	109.80	388.40	368.13	701.37
01:07:29	109.83	391.90	369.27	706.13
01:07:39	109.87	394.07	370.00	701.10
01:07:49	109.97	396.13	370.07	694.17
01:07:59	110.23	388.13	370.20	705.90
01:08:09	110.37	383.40	369.37	714.73
01:08:19	110.50	384.07	369.17	713.10
01:08:29	110.67	383.90	369.40	713.37
01:08:39	110.83	384.53	369.53	717.43
01:08:49	111.13	385.73	367.03	711.40
01:08:59	111.33	399.60	366.10	709.73
01:09:09	111.67	400.17	365.40	682.87
01:09:19	111.97	400.87	365.70	661.90
01:09:29	112.40	401.27	365.93	642.30

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:09:39	112.70	401.13	365.20	628.70
01:09:49	113.07	400.30	363.87	623.80
01:09:59	113.43	399.73	362.70	621.97
01:10:09	113.67	399.03	360.70	598.70
01:10:19	114.13	397.77	359.17	595.67
01:10:29	114.50	396.03	358.20	622.53
01:10:39	115.10	394.57	357.70	623.73
01:10:49	115.80	394.40	356.57	621.13
01:10:59	116.67	397.67	355.43	601.10
01:11:09	117.33	402.13	354.90	612.17
01:11:19	117.83	400.23	357.83	613.30
01:11:29	118.20	399.70	359.00	611.20
01:11:39	118.40	399.20	360.17	596.43
01:11:49	118.40	397.57	359.27	596.00
01:11:59	118.33	396.57	358.43	596.40
01:12:09	118.37	396.30	357.87	599.90
01:12:19	118.50	395.63	358.50	582.00
01:12:29	118.57	393.83	358.20	569.20
01:12:39	118.53	392.43	356.33	547.30
01:12:49	118.47	390.87	353.87	538.63
01:12:59	118.23	387.50	351.67	538.03
01:13:09	118.03	384.10	350.93	519.30
01:13:19	117.73	381.80	349.93	485.07
01:13:29	117.63	379.33	348.47	467.67
01:13:39	117.77	376.97	346.20	452.87
01:13:49	117.83	374.50	343.43	445.37
01:13:59	117.90	372.10	340.53	435.97
01:14:09	118.03	369.90	338.77	520.13
01:14:19	117.90	368.10	338.53	575.27
01:14:29	117.73	366.67	339.30	602.33
01:14:39	117.67	366.67	339.10	630.23
01:14:49	117.57	366.60	339.57	645.67
01:14:59	117.20	367.93	340.33	655.93
01:15:09	116.93	369.33	340.67	660.30
01:15:19	116.73	370.97	341.57	661.77
01:15:29	116.57	372.97	341.90	670.33
01:15:39	116.50	375.73	341.43	675.50
01:15:49	116.50	376.50	343.90	674.73

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:15:59	116.70	376.27	343.80	680.17
01:16:09	116.83	375.10	344.33	686.00
01:16:19	116.90	378.40	347.87	690.97
01:16:29	116.93	381.07	353.80	701.57
01:16:39	117.17	388.53	357.27	706.20
01:16:49	117.37	392.27	359.83	703.90
01:16:59	117.53	396.63	363.67	707.27
01:17:09	117.73	403.57	367.33	713.13
01:17:19	117.93	408.67	369.50	715.17
01:17:29	117.97	408.03	370.17	723.00
01:17:39	117.93	416.50	372.20	724.13
01:17:49	117.93	420.23	373.10	723.67
01:17:59	117.93	424.07	374.43	722.33
01:18:09	118.10	427.30	376.10	723.33
01:18:19	118.50	431.00	376.70	724.23
01:18:29	119.07	434.93	377.60	727.37
01:18:39	119.70	438.10	379.80	725.57
01:18:49	120.43	441.97	383.13	722.83
01:18:59	121.20	445.10	382.23	722.30
01:19:09	122.00	448.77	381.57	723.10
01:19:19	122.80	451.27	382.47	726.50
01:19:29	123.60	453.87	383.07	730.03
01:19:39	124.43	457.57	383.97	733.43
01:19:49	125.07	461.30	385.50	732.33
01:19:59	125.83	463.10	387.93	735.27
01:20:09	126.57	464.23	389.80	736.93
01:20:19	127.33	463.63	389.80	740.37
01:20:29	128.37	470.07	388.87	740.07
01:20:39	129.33	471.00	388.97	737.73
01:20:49	130.27	471.87	389.10	736.33
01:20:59	130.97	472.50	389.10	733.13
01:21:09	131.33	472.30	389.40	733.73
01:21:19	131.60	472.90	389.80	733.00
01:21:29	132.13	476.23	390.73	733.23
01:21:39	132.63	477.80	391.13	736.83
01:21:49	133.07	479.43	391.27	733.77
01:21:59	133.63	481.17	392.33	730.77
01:22:09	134.20	481.77	393.20	731.07

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:22:19	134.63	482.47	393.57	731.73
01:22:29	135.17	483.73	394.00	729.63
01:22:39	135.80	487.27	395.30	732.67
01:22:49	136.83	488.67	401.67	729.60
01:22:59	137.83	491.60	403.70	724.03
01:23:09	139.20	495.67	404.13	728.57
01:23:19	140.33	497.37	406.03	735.17
01:23:29	141.43	499.33	409.33	742.00
01:23:39	142.47	502.07	410.30	744.53
01:23:49	143.47	505.30	411.63	744.33
01:23:59	144.47	508.73	413.57	748.97
01:24:09	145.20	511.53	415.67	751.87
01:24:19	145.63	513.73	416.97	752.67
01:24:29	146.00	516.87	418.43	758.07
01:24:39	146.53	519.97	420.17	758.13
01:24:49	147.10	522.20	422.00	761.83
01:24:59	147.67	522.93	425.37	762.70
01:25:09	148.17	526.43	428.13	767.37
01:25:19	149.07	529.57	431.47	768.60
01:25:29	149.93	529.30	434.13	768.20
01:25:39	150.77	531.10	437.40	766.97
01:25:49	151.63	534.80	440.47	771.13
01:25:59	152.07	538.23	443.53	772.80
01:26:09	152.67	541.93	448.83	771.03
01:26:19	153.43	545.70	452.33	775.43
01:26:29	154.23	549.40	455.67	777.23
01:26:39	155.17	552.53	456.47	778.90
01:26:49	155.83	554.57	458.07	787.83
01:26:59	156.43	558.00	458.37	789.33
01:27:09	157.03	557.77	457.43	795.03
01:27:19	157.77	557.97	459.47	800.90
01:27:29	158.87	558.80	462.87	807.40
01:27:39	160.00	562.10	465.80	823.27
01:27:49	160.90	566.03	469.07	823.33
01:27:59	161.57	571.20	471.77	837.53
01:28:09	162.13	575.83	474.43	837.90
01:28:19	162.47	580.57	475.53	845.13
01:28:29	163.03	584.57	480.93	850.57

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:28:39	164.13	587.60	485.67	843.03
01:28:49	164.97	591.97	488.07	848.87
01:28:59	165.50	594.87	489.73	843.10
01:29:09	165.90	596.30	490.43	835.73
01:29:19	166.50	600.53	489.03	837.63
01:29:29	167.23	603.53	491.67	831.77
01:29:39	168.37	603.70	494.10	821.07
01:29:49	169.80	603.83	494.43	825.27
01:29:59	171.17	605.33	496.57	829.47
01:30:09	172.37	609.03	498.07	825.10
01:30:19	173.23	608.70	503.40	827.80
01:30:29	174.30	609.80	507.43	824.20
01:30:39	175.40	612.17	509.13	823.07
01:30:49	176.57	613.93	507.73	824.17
01:30:59	178.00	615.33	506.53	817.17
01:31:09	179.60	618.90	508.10	816.50
01:31:19	181.70	621.80	508.83	814.63
01:31:29	183.63	623.90	508.20	819.17
01:31:39	185.47	624.50	510.73	818.90
01:31:49	187.17	625.00	514.03	816.47
01:31:59	188.43	624.57	514.23	824.70
01:32:09	189.80	624.30	513.47	819.60
01:32:19	191.03	624.33	514.37	823.03
01:32:29	192.07	626.03	513.20	825.00
01:32:39	193.27	629.27	512.27	822.37
01:32:49	195.00	629.57	511.87	818.50
01:32:59	196.90	628.53	513.20	820.43
01:33:09	198.67	631.33	514.47	822.00
01:33:19	200.10	630.83	514.03	826.73
01:33:29	201.50	631.07	513.87	829.47
01:33:39	202.93	628.73	515.83	826.23
01:33:49	204.60	630.10	517.20	828.63
01:33:59	207.17	634.77	518.83	834.10
01:34:09	208.73	636.40	519.73	836.77
01:34:19	210.50	637.63	521.67	836.87
01:34:29	212.27	637.50	524.40	844.90
01:34:39	214.47	636.57	529.17	847.57
01:34:49	216.40	632.60	530.00	844.00

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:34:59	218.50	627.63	529.23	847.30
01:35:09	220.40	627.97	530.27	850.47
01:35:19	222.47	626.87	531.27	856.17
01:35:29	225.30	629.60	531.77	859.53
01:35:39	228.97	632.33	531.43	865.97
01:35:49	232.57	633.63	532.20	877.73
01:35:59	235.50	634.30	536.00	880.70
01:36:09	237.70	640.80	538.67	882.17
01:36:19	239.47	641.97	539.27	882.60
01:36:29	240.67	641.27	538.37	885.47
01:36:39	241.80	640.80	539.93	884.60
01:36:49	243.10	640.53	540.67	882.60
01:36:59	244.20	640.87	542.70	880.67
01:37:09	245.13	642.60	545.20	886.70
01:37:19	246.00	644.30	546.30	888.13
01:37:29	247.80	646.20	547.93	886.97
01:37:39	249.07	647.80	549.53	885.07
01:37:49	250.47	650.57	551.97	883.53
01:37:59	252.03	653.17	554.90	886.10
01:38:09	254.30	656.53	557.63	888.73
01:38:19	256.83	660.43	559.00	887.60
01:38:29	258.53	663.07	560.40	887.73
01:38:39	260.17	663.50	561.57	888.57
01:38:49	262.00	663.77	563.57	890.23
01:38:59	264.83	663.57	564.73	886.27
01:39:09	267.50	663.40	564.50	879.93
01:39:19	269.70	663.53	565.00	883.72
01:39:29	271.70	663.30	565.70	887.53
01:39:39	273.03	663.23	564.13	881.73
01:39:49	265.85	663.40	563.97	878.53
01:39:59	266.60	663.90	563.47	883.10
01:40:09	267.45	665.80	562.47	889.27
01:40:19	278.30	667.70	562.63	882.73
01:40:29	279.70	668.57	563.13	884.47
01:40:39	281.17	669.50	562.60	872.17
01:40:49	282.60	670.80	564.70	874.23
01:40:59	283.93	672.53	568.23	865.00
01:41:09	285.17	674.23	568.17	859.23

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:41:19	285.83	675.50	566.53	864.40
01:41:29	286.43	676.40	565.90	867.93
01:41:39	287.53	676.33	565.37	858.77
01:41:49	288.27	676.00	565.27	858.17
01:41:59	288.63	678.23	566.57	868.10
01:42:09	289.33	679.50	567.37	866.67
01:42:19	291.17	683.23	567.30	856.57
01:42:29	294.33	686.23	566.10	860.93
01:42:39	297.67	688.27	566.83	850.17
01:42:49	300.03	689.37	566.27	850.83
01:42:59	300.43	688.87	565.63	864.93
01:43:09	300.43	688.10	565.67	866.13
01:43:19	300.27	690.47	566.53	851.53
01:43:29	300.23	694.53	566.20	851.10
01:43:39	300.53	699.57	566.87	841.90
01:43:49	301.40	701.77	567.33	843.63
01:43:59	302.57	703.23	566.27	855.67
01:44:09	304.40	702.83	566.53	843.90
01:44:19	305.93	702.37	568.93	846.43
01:44:29	306.90	701.27	569.70	857.77
01:44:39	307.73	699.80	568.90	854.73
01:44:49	308.67	699.13	568.73	848.57
01:44:59	308.90	698.97	568.13	835.63
01:45:09	309.13	698.30	566.43	824.30
01:45:19	310.00	697.83	565.10	815.47
01:45:29	310.90	697.93	563.80	826.73
01:45:39	311.73	696.97	565.17	814.73
01:45:49	312.50	696.17	565.40	813.97
01:45:59	312.97	696.63	564.77	821.90
01:46:09	313.53	696.83	563.03	818.23
01:46:19	314.50	696.87	562.00	813.07
01:46:29	315.33	697.00	561.43	813.50
01:46:39	316.20	696.43	560.30	801.90
01:46:49	316.67	695.43	561.13	796.20
01:46:59	317.10	694.80	561.60	794.50
01:47:09	318.10	694.67	562.43	779.37
01:47:19	318.97	694.60	563.23	773.73
01:47:29	319.57	693.83	560.23	778.00

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:47:39	320.23	692.13	559.37	764.10
01:47:49	320.73	690.73	561.13	751.00
01:47:59	321.37	690.57	562.33	749.73
01:48:09	322.07	691.03	562.53	756.90
01:48:19	322.97	689.90	562.30	754.57
01:48:29	323.70	690.77	560.00	762.67
01:48:39	325.60	689.73	559.13	752.60
01:48:49	327.33	690.87	556.43	744.17
01:48:59	328.60	687.73	554.20	739.57
01:49:09	329.30	683.57	554.27	736.00
01:49:19	329.73	683.43	551.93	727.47
01:49:29	330.00	684.70	550.27	715.57
01:49:39	330.67	681.93	548.80	713.20
01:49:49	330.67	675.13	546.93	717.67
01:49:59	330.80	674.40	544.37	725.00
01:50:09	331.30	674.67	543.60	726.87
01:50:19	331.60	674.17	541.57	725.37
01:50:29	332.10	673.47	539.53	723.40
01:50:39	332.77	673.73	539.00	710.77
01:50:49	333.13	673.83	536.90	696.90
01:50:59	334.23	674.20	539.77	706.10
01:51:09	334.70	674.00	539.70	713.10
01:51:19	334.80	673.67	539.80	701.33
01:51:29	334.83	672.40	535.47	698.27
01:51:39	335.27	671.87	533.20	687.37
01:51:49	335.93	671.73	531.37	688.57
01:51:59	336.30	670.70	530.63	675.87
01:52:09	336.57	670.27	528.77	679.13
01:52:19	337.47	670.63	527.90	683.20
01:52:29	338.20	670.50	527.60	675.23
01:52:39	338.97	669.97	527.37	666.57
01:52:49	340.00	669.43	527.17	660.57
01:52:59	341.00	669.10	526.40	664.03
01:53:09	341.67	669.00	524.17	662.97
01:53:19	342.20	668.73	522.20	659.20
01:53:29	342.63	668.07	522.03	653.87
01:53:39	342.80	668.20	521.23	656.27
01:53:49	343.17	667.33	520.60	652.73

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
01:53:59	343.43	666.40	519.43	652.30
01:54:09	344.13	665.43	517.13	648.00
01:54:19	345.53	663.77	514.07	636.83
01:54:29	346.10	662.13	513.83	630.87
01:54:39	347.03	660.80	514.53	631.10
01:54:49	348.37	656.87	516.57	624.53
01:54:59	349.90	656.10	515.60	616.30
01:55:09	350.60	653.20	516.17	608.43
01:55:19	351.13	651.80	513.97	603.30
01:55:29	352.27	648.80	512.40	604.87
01:55:39	353.50	648.13	510.10	597.03
01:55:49	354.27	646.97	507.77	596.87
01:55:59	354.40	644.67	507.27	586.13
01:56:09	353.80	640.93	505.63	585.90
01:56:19	353.10	639.80	504.03	583.97
01:56:29	352.70	637.27	501.07	579.80
01:56:39	352.37	633.30	500.13	577.47
01:56:49	352.20	630.97	497.17	574.17
01:56:59	352.37	626.77	493.57	572.00
01:57:09	352.50	624.20	493.63	570.83
01:57:19	352.93	621.70	491.80	564.80
01:57:29	353.17	620.03	489.27	555.90
01:57:39	353.27	618.10	487.90	556.63
01:57:49	353.20	615.43	486.50	548.43
01:57:59	353.20	612.67	484.30	543.33
01:58:09	353.40	610.63	482.47	538.27
01:58:19	353.40	608.83	480.00	535.30
01:58:29	353.50	607.30	478.07	532.73
01:58:39	353.53	604.60	475.00	533.43
01:58:49	353.77	602.63	472.93	532.87
01:58:59	354.13	599.70	470.87	531.43
01:59:09	355.10	597.17	469.40	522.67
01:59:19	356.27	594.27	466.90	519.37
01:59:29	357.30	591.80	465.07	515.03
01:59:39	358.80	589.53	463.33	510.37
01:59:49	360.03	586.93	460.93	505.87
01:59:59	361.23	584.13	458.93	501.23
02:00:09	361.80	581.70	457.13	495.07

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
02:00:19	361.77	578.63	454.93	489.27
02:00:29	362.07	575.30	453.50	484.60
02:00:39	362.37	573.17	451.70	483.87
02:00:49	362.17	571.37	450.10	481.87
02:00:59	361.93	569.00	448.00	482.70
02:01:09	361.97	566.27	446.67	482.63
02:01:19	362.23	564.33	445.10	482.83
02:01:29	362.37	562.13	444.83	478.73
02:01:39	362.93	560.30	442.67	479.30
02:01:49	363.33	557.87	441.40	478.07
02:01:59	363.93	555.50	440.83	476.73
02:02:09	363.93	553.93	440.33	478.93
02:02:19	364.63	551.80	439.27	473.03
02:02:29	365.27	549.83	436.50	468.40
02:02:39	365.73	547.17	435.53	459.00
02:02:49	365.73	545.33	433.57	452.47
02:02:59	365.50	543.57	432.40	447.67
02:03:09	364.63	541.97	430.67	444.53
02:03:19	363.67	540.10	429.83	438.93
02:03:29	362.60	538.23	428.73	437.43
02:03:39	361.43	535.97	427.70	434.70
02:03:49	360.60	534.57	426.47	432.90
02:03:59	359.63	532.43	425.80	433.13
02:04:09	358.60	530.57	425.13	431.33
02:04:19	358.77	528.53	423.37	430.07
02:04:29	357.23	526.57	422.33	427.97
02:04:39	355.83	524.97	421.67	425.73
02:04:49	354.57	523.30	419.27	425.47
02:04:59	353.27	521.97	416.93	423.77
02:05:09	352.00	520.83	414.80	421.80
02:05:19	350.90	519.00	412.93	420.30
02:05:29	349.87	517.10	413.03	419.10
02:05:39	349.10	515.53	410.97	418.37
02:05:49	348.17	514.33	410.53	417.87
02:05:59	347.20	513.17	409.43	416.47
02:06:09	346.27	512.00	409.70	415.83
02:06:19	345.30	510.30	409.17	413.27
02:06:29	344.33	508.40	409.13	409.93

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
02:06:39	343.13	506.60	409.00	408.23
02:06:49	342.20	505.23	407.97	406.23
02:06:59	341.20	503.73	406.83	402.97
02:07:09	340.27	502.47	405.70	399.67
02:07:19	339.50	500.83	405.03	396.90
02:07:29	338.70	499.40	403.03	393.77
02:07:39	338.03	498.23	401.57	391.13
02:07:49	337.40	496.73	399.70	387.03
02:07:59	336.87	494.90	399.23	381.10
02:08:09	336.27	493.20	396.10	376.70
02:08:19	335.63	491.53	394.67	373.63
02:08:29	335.10	490.13	392.67	369.83
02:08:39	334.43	488.50	390.40	364.30
02:08:49	333.77	486.50	389.27	361.03
02:08:59	333.13	484.50	386.70	359.67
02:09:09	332.43	482.37	385.30	357.87
02:09:19	331.90	480.33	384.00	355.03
02:09:29	331.40	478.37	381.83	350.57
02:09:39	330.97	476.70	380.47	347.27
02:09:49	330.50	474.90	378.17	343.70
02:09:59	330.07	472.73	376.57	342.30
02:10:09	329.63	470.70	374.80	341.37
02:10:19	329.17	468.47	373.83	339.83
02:10:29	328.70	466.33	372.33	339.83
02:10:39	328.13	464.07	369.57	339.67
02:10:49	327.67	462.30	367.13	338.30
02:10:59	327.10	460.30	365.20	335.07
02:11:09	326.43	458.37	363.97	332.00
02:11:19	325.83	456.13	362.03	330.20
02:11:29	325.27	454.10	360.37	327.23
02:11:39	324.83	451.73	357.33	325.27
02:11:49	324.30	449.53	355.23	322.03
02:11:59	323.63	447.07	351.67	317.03
02:12:09	323.07	444.80	350.80	314.03
02:12:19	322.37	442.73	349.60	310.47
02:12:29	321.60	440.03	347.60	308.37
02:12:39	320.87	437.13	345.70	307.10
02:12:49	320.10	434.70	342.57	305.10

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
02:12:59	319.37	432.17	340.50	303.63
02:13:09	318.67	429.93	338.93	301.20
02:13:19	317.83	427.23	335.83	298.93
02:13:29	317.17	424.50	333.03	295.23
02:13:39	316.33	419.93	329.07	291.10
02:13:49	315.60	416.37	326.73	287.03
02:13:59	314.83	412.60	324.20	283.73
02:14:09	314.03	409.60	322.50	280.77
02:14:19	313.33	407.27	318.97	276.80
02:14:29	312.53	404.40	317.90	273.53
02:14:39	311.77	402.00	316.90	269.67
02:14:49	311.00	399.07	314.87	265.63
02:14:59	310.13	396.80	313.67	262.80
02:15:09	309.43	393.73	311.50	259.33
02:15:19	308.60	391.83	310.20	257.77
02:15:29	307.80	389.90	308.03	254.40
02:15:39	307.07	387.00	305.37	252.33
02:15:49	306.23	385.33	303.57	248.70
02:15:59	305.50	382.80	301.27	245.80
02:16:09	304.57	380.70	299.37	244.93
02:16:19	303.63	378.70	297.17	244.60
02:16:29	302.80	376.77	295.57	241.50
02:16:39	301.80	374.47	293.37	237.70
02:16:49	300.80	371.23	291.03	234.10
02:16:59	299.80	369.60	290.53	231.40
02:17:09	298.80	367.23	287.87	228.50
02:17:19	297.77	364.80	286.03	227.67
02:17:29	296.70	363.10	283.97	227.33
02:17:39	295.60	361.50	282.30	224.50
02:17:49	294.53	359.47	281.37	221.87
02:17:59	293.40	356.93	279.17	218.97
02:18:09	292.23	355.03	277.30	216.13
02:18:19	291.23	353.03	275.47	213.60
02:18:29	290.13	351.30	273.83	211.80
02:18:39	289.07	349.67	272.27	210.17
02:18:49	287.97	347.80	271.17	209.43
02:18:59	286.90	345.47	269.70	208.83
02:19:09	285.90	343.33	269.27	208.17

เวลา	$T_{l,ECCS}$ (°C)	$T_{m,ECCS}$ (°C)	$T_{u,ECCS}$ (°C)	$T_{f,ECCS}$ (°C)
02:19:19	284.77	341.80	268.97	207.37
02:19:29	283.77	340.50	268.20	206.77
02:19:39	282.77	338.33	266.63	206.13
02:19:49	281.87	337.27	265.83	205.23
02:19:59	280.97	335.90	265.53	204.10
02:20:09	279.97	334.30	264.43	203.63
02:20:19	279.00	332.73	262.17	203.23
02:20:29	277.97	331.00	260.40	202.40
02:20:39	276.97	329.77	259.27	201.93
02:20:49	275.90	328.07	257.80	199.83
02:20:59	274.80	325.23	255.37	197.67
02:21:09	273.67	324.47	254.87	195.27
02:21:19	272.63	323.00	255.50	193.20
02:21:29	271.60	321.30	253.63	190.70
02:21:39	270.53	319.90	252.17	187.37
02:21:49	269.43	318.00	249.67	184.30
02:21:59	268.40	315.87	247.57	181.10
02:22:09	267.30	313.77	246.33	178.20
02:22:19	266.33	312.47	245.90	175.37
02:22:29	265.17	310.97	245.23	172.77
02:22:39	264.07	309.27	244.33	170.53
02:22:49	263.00	307.87	243.07	168.40
02:22:59	261.93	306.43	241.90	166.47
02:23:09	260.87	304.73	240.10	165.10
02:23:19	259.67	303.03	238.23	163.73
02:23:29	258.57	301.13	237.10	162.13
02:23:39	257.50	299.40	235.60	160.90
02:23:49	256.37	298.37	235.13	160.37
02:23:59	255.27	296.23	232.90	159.03
02:24:09	254.13	294.70	231.47	157.73
02:24:19	253.00	293.50	230.33	156.67

อัตราการไหลอากาศหลังการเผาไหม้ที่ออกจากแกนเตากรณีแกนเตาแบบ NCCS

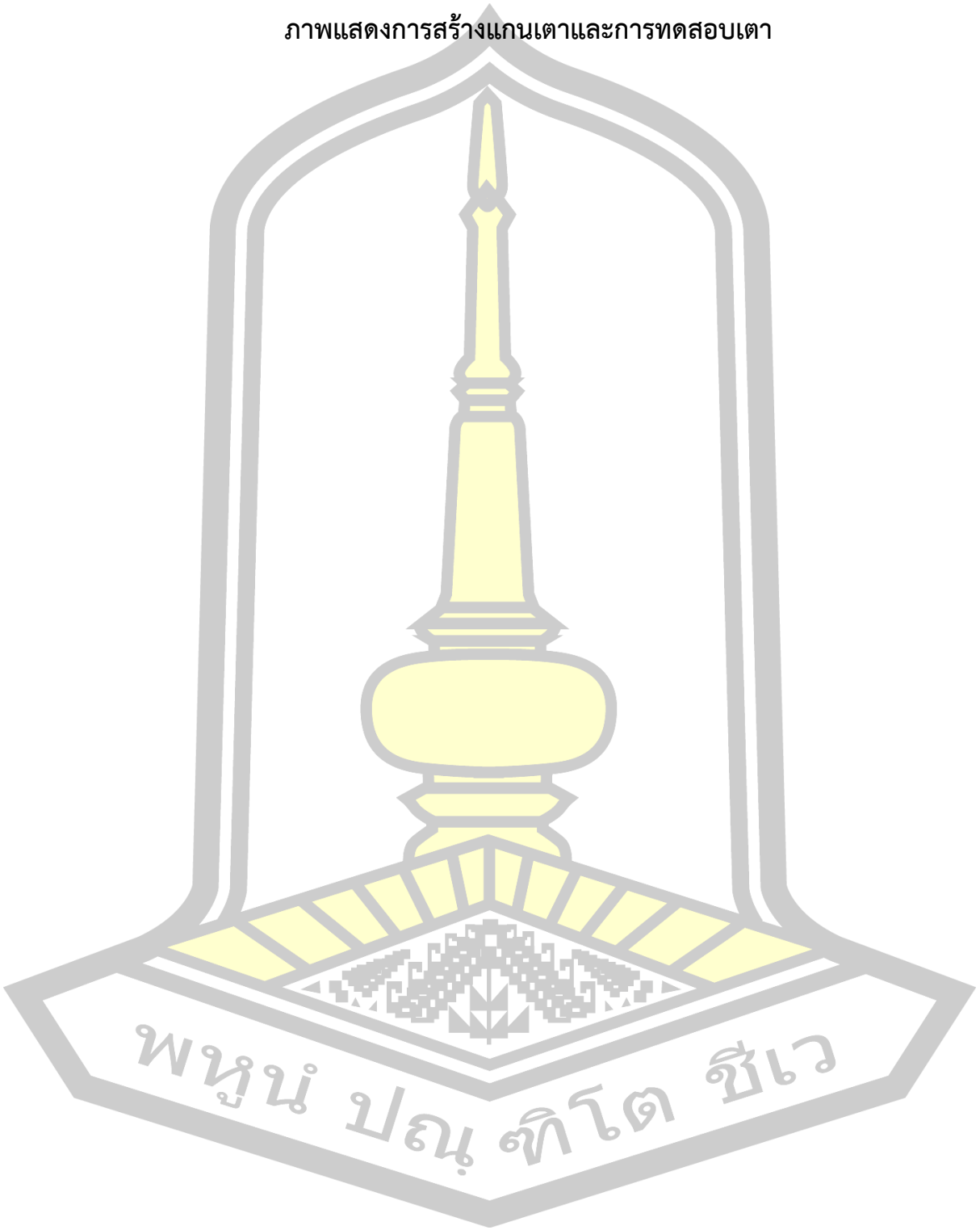
เวลา (นาที)	อัตราการไหลทดสอบครั้งที่ 1 (NCCS1) (m^3/hr)	อัตราการไหลทดสอบครั้งที่ 2 (NCCS3) (m^3/hr)	อัตราการไหลทดสอบครั้งที่ 3 (NCCS3) (m^3/hr)	อัตราการไหลเฉลี่ย (NCCS_AV) (m^3/hr)
0	34	30	32	32
5	32	30	34	32
10	35	26	32	31
15	32	28	30	30
20	43	42	35	40
25	42	45	48	45
30	48	52	59	53
35	52	53	60	55
40	63	58	59	60
45	75	68	64	69
50	77	73	63	71
55	72	75	69	72
60	72	77	70	73
65	75	85	80	80
70	81	88	83	84
75	85	93	89	89

อัตราการไหลอากาศหลังการเผาไหม้ที่ออกจากแกนเตากรณีแกนเตาแบบ ECCS

เวลา (นาที)	อัตราการไหลทดสอบครั้งที่ 1 (ECCS1) (m^3/hr)	อัตราการไหลทดสอบครั้งที่ 2 (ECCS2) (m^3/hr)	อัตราการไหลทดสอบครั้งที่ 3 (ECCS3) (m^3/hr)	อัตราการไหลเฉลี่ย (ECCS_AV) (m^3/hr)
0	37	35	30	34
5	32	35	29	32
10	30	31	29	30
15	29	25	21	25
20	28	25	22	25
25	26	27	25	26
30	25	26	27	26
35	25	21	32	26
40	28	24	29	27
45	28	25	28	27
50	37	39	32	36
55	46	40	37	41
60	48	45	39	44
65	53	48	55	52
70	56	50	59	55
75	59	54	64	59

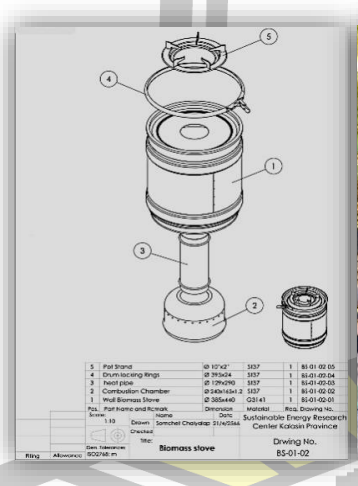
ภาคผนวก ข

ภาพแสดงการสร้างแกนเตาและการทดสอบเตา



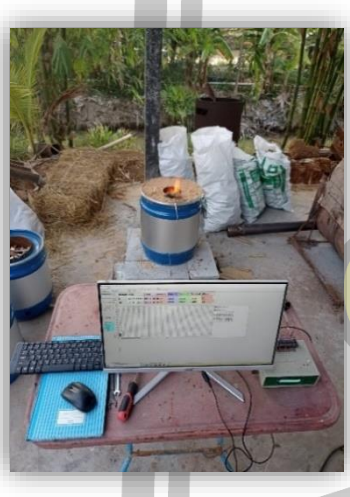
ภาพเตารักษ์โลกทุ่งกุลาร้องไห้ (เตาทดสอบ)

ภาพการออกแบบเตาต้นแบบ และการสร้างเตาต้นแบบ



พหูน ปณฑิโต ชีเว

ภาพการทดสอบเตาทดสอบและเตาต้นแบบ



พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ภาพการทดสอบเตาทดสอบและเตาต้นแบบ (ต่อ)

ภาพถ่านชีวภาพ (Biochar) ที่ได้จากเตาชีวมวลแก๊สซิไฟเออร์ต้นแบบ 50 ลิตร (HBG-50L)

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสมเจตน์ ไชยลาภ
วันเกิด	12 มกราคม 2519
สถานที่เกิด	38 หมู่ 9 ต.บัวแดง อ.ปทุมรัตต์ จ.ร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	124/1 หมู่ 15 ต.กมลาไสย อ.กมลาไสย จ.กาฬสินธุ์ 46130
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิทยากรฝึกอบรมพลังงานยั่งยืน
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์วิจัยพลังงานยั่งยืนจังหวัดกาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา	ปี 2532 ประถมศึกษา โรงเรียนปทุมรัตต์วิทยาคาร ต.บัวแดง อ.ปทุมรัตต์ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2538 มัธยมศึกษา โรงเรียนปทุมรัตต์พิทยาคม ต.บัวแดง อ.ปทุมรัตต์ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2542 ศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี 2548 หลักสูตรเภสัชแผนไทย ศูนย์การแพทย์แผนไทย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี 2560 ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์สุขภาพ สาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ปี 2567 ปริญญาโท สาขาพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ปี 2550 - 2562 ทุนสนับสนุนงานวิจัยเพื่อท้องถิ่น (Community-Based Research: CBR) และงานวิจัยพลังงานยั่งยืน สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปี 2566 ทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	รูปแบบการพัฒนาศักยภาพช่างพลังงานหมุนเวียนชุมชนจังหวัดกาฬสินธุ์

พหุน ปเณ ศกโต ชีเว